

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. ING.

PAR
EMMANUEL JOLYS

**RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE TRIANGULATION AU LASER DANS LE
CADRE D'APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DE
L'AGROALIMENTAIRE**

MONTREAL, LE 13 AVRIL 2001

© Droits réservés, Emmanuel Jolys 2001

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

- M. Mohamed Cheriet, directeur de mémoire
Département de Génie de la Production Automatisée à l'École de technologie supérieure
- M. Pascal Bigras, codirecteur
Département de Génie de la Production Automatisée à l'École de technologie supérieure
- M. Richard Lepage, professeur
Département de Génie de la Production Automatisée à l'École de technologie supérieure
- M. Sébastien Roy, professeur adjoint
Département d'Informatique et de Recherche Opérationnelle à l'Université de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT CE JURY ET UN PUBLIC

LE 14 MARS, 2001

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE TRIANGULATION AU LASER DANS LE CADRE D'APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DE L'AGROALIMENTAIRE

Emmanuel Jolys

Sommaire

L'automatisation dans le domaine de l'agroalimentaire et plus particulièrement dans les salles de découpe pour les viandes de porc et de bœuf est peu implantée. Dû à la difficulté de traiter un produit aussi variable, il est difficile de créer des machines automatiques pour réaliser la découpe de pièce de viandes. De plus, les cadences très importantes en Amérique du Nord conjuguées avec des types de coupe qui peuvent varier d'un établissement à l'autre compte tenu de la clientèle (américaine, canadienne, asiatique,...) rendent très difficile l'automatisation. Actuellement, la coupe, que ce soit pour le porc ou le bœuf, est encore très largement effectuée à la main.

L'objectif principal de ce présent mémoire est de mettre au point un système d'acquisition pour numériser des pièces de viande, ce qui consiste à formuler la relation géométrique entre la caméra, le laser et la scène, à choisir le matériel adéquat, à élaborer le logiciel nécessaire et à intégrer l'ensemble des composantes du système. L'information est générée sous forme d'images de topologie (3D) et en niveaux de gris (2D). L'application d'algorithmes de traitement d'images sur ces données permet de calculer une trajectoire qui permet par la suite de guider un outil de coupe pour effectuer une tâche spécifique.

Le principe de base de ce système d'acquisition est la triangulation au laser. Une ligne lumineuse est projetée sur la scène à numériser. La déformation de la ligne par le relief est captée par une caméra. Connaissant la relation géométrique entre le laser et le capteur, l'analyse des variations de la ligne laser permet de trouver la hauteur et la position des objets dans la scène. Afin de numériser différentes pièces de viande, le système d'acquisition doit être modulaire. Les composantes doivent donc être des produits standards, ce qui a l'avantage de réduire les temps de développement lors de modifications, de suivre l'évolution technologique de chaque composante ainsi que de permettre d'avoir des équivalents chez d'autres fournisseurs pour faciliter la production. Pour l'étalonnage de ce système, une approche est proposée qui, malgré sa simplicité, procure la précision et la répétitivité suffisantes dans le contexte des applications à réaliser. Pour respecter les temps de cycle, différentes solutions techniques ont été

proposées comme l'acquisition en « *double buffering* »¹, le filtrage de la ligne laser avec des filtres optiques et l'utilisation d'une caméra avec acquisition partielle.

Trois applications développées avec ce système d'acquisition permettent l'évaluation de ce dernier. La première évalue de façon quantitative l'approche proposée en analysant la répétitivité de la machine de séparation de la longe du flanc. La deuxième utilise les données générées (images de topologie et en niveaux de gris) pour discriminer le côté (droit ou gauche) du flanc avant de générer la trajectoire de coupe. L'évaluation est faite de façon qualitative en analysant les résultats de la classification. La dernière, la reconstruction de la surface d'un œil de ronde en vue de son dégraissage, confirme la pertinence d'utiliser un tel système d'acquisition pour développer des machines ayant des opérations complexes à automatiser.

La triangulation au laser répond bien à la demande en automatisation de cette industrie de par son coût mais surtout au vu de ses performances : vitesse, précision et répétitivité, richesse et densité de l'information qui permettent d'élaborer des algorithmes de traitement d'images appropriés au domaine d'application.

¹ Utilisation d'une bascule avec deux images : pendant la numérisation d'une image, l'autre est traitée et vice versa.

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à mes directeurs de maîtrise, M. Cheriet et M. Bigras pour la qualité de leur encadrement, leurs encouragements et leurs conseils tout au long du développement de ce projet. Je remercie tout particulièrement M. Cheriet pour ses judicieuses remarques et M. Bigras pour son apport dans la rédaction.

Pour la confiance qui m'a été accordée dans le cadre de la réalisation des applications industrielles, je remercie M. Tessier de SNC Lavallin-Audet et M. Fauret de GE Leblanc Inc.

Je tiens aussi à remercier ma conjointe, Caroline, pour sa compréhension et son support tout au long de ma maîtrise ainsi que mes enfants, Tristan et Loïc, auprès desquels j'ai été peu présent ces deux dernières années.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	I
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES	XI
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1: REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
1.1 DÉFINITION DU TERME 3D	7
1.2 TECHNIQUES D'ACQUISITION 3D	8
1.3 MÉTHODE ACTIVE : BALAYAGE AVEC UNE LUMIÈRE CODÉE EN NIVEAU DE GRIS.....	11
1.4 MÉTHODE ACTIVE : BALAYAGE AVEC UN POINT LUMINEUX	12
1.5 MÉTHODE ACTIVE : BALAYAGE AVEC UNE LIGNE LUMINEUSE	13
CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE	15
2.1 INTRODUCTION	15
2.2 PRINCIPE.....	15
2.3 CONFIGURATION OPTIQUE	18
2.3.1 Équations conventionnelles du système.....	19
2.3.2 Équations du système proposé	23
2.3.3 Correction spatiale	30
2.3.4 Erreur	33
2.3.5 Occlusion	35
2.4 EXTRACTION DE LA LIGNE LASER DANS L'IMAGE ACQUISE	37
2.4.1 Localisation du laser sur le CCD	37
2.4.2 Techniques de filtrage.....	39

2.5 IMPLANTATION	45
CHAPITRE 3: EXPÉRIMENTATION ET VALIDATION	50
3.1 INTRODUCTION	50
3.2 APPLICATION DE LA SÉPARATION DE LA LONGE DU FLANC	50
3.2.1 Introduction.....	50
3.2.2 Description du système	51
3.2.3 Résultats.....	53
3.3 APPLICATION DU LEVAGE DU FLANC.....	58
3.3.1 Introduction.....	58
3.3.2 Description générale	59
3.3.3 Extraction des caractéristiques.....	64
3.3.4 Conclusion	74
3.4 RECONSTRUCTION DE LA SURFACE D'UN ŒIL DE RONDE.....	74
3.4.1 Introduction.....	74
3.4.2 Description générale	75
3.4.3 Modélisation 3D	78
3.4.4 Implantation	84
3.4.5 Présentation du logiciel.....	90
3.4.6 Résultats.....	94
CONCLUSION	50
ANNEXE 1: CALCULS POUR LA TRIANGULATION 3D SELON L'APPROCHE CONVENTIONNELLE	100
ANNEXE 2: CALCULS POUR LA TRIANGULATION 3D SELON L'APPROCHE PROPOSÉE.....	105
ANNEXE 3: INTERFACE DU LOGICIEL DE L'ŒIL DE RONDE	113
RÉFÉRENCES.....	117

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : TEMPS DE CYCLE.....	4
TABLEAU 2 : STATISTIQUES GLOBALES.....	26
TABLEAU 3 : VALEURS UTILISÉES LORS DE L'ÉTALONNAGE	35
TABLEAU 4 : VALEURS MESURÉES PAR LE VERNIER ET LA VISION 3D.....	35
TABLEAU 5 :CAPACITÉ D'ACQUISITION AVEC LA CAMÉRA TM-6710.....	47
TABLEAU 6 : STATISTIQUES DU TEST 1	53
TABLEAU 7 : STATISTIQUES DU TEST 2	53
TABLEAU 8 : RÉSULTATS DU TEST 1	55
TABLEAU 9 : RÉSULTATS DU TEST 2	56
TABLEAU 10 : STATISTIQUES (CHAUVENET) POUR LE TEST 1	57
TABLEAU 11 : STATISTIQUES (CHAUVENET) POUR LE TEST 2	57
TABLEAU 12 : RÉSULTATS (CHAUVENET) POUR LE TEST 1	57
TABLEAU 13 : RÉSULTATS (CHAUVENET) POUR LE TEST 2	58
TABLEAU 14 : RÉSULTAT DU CLASSIFICATEUR	74
TABLEAU 15 : TEMPS DE CALCUL EN FONCTION DU NOMBRE DE SOMMETS	94

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHÉMA SYNOPTIQUE DU SYSTÈME PRÉCONISÉ.....	6
FIGURE 2 : SURFACES VISIBLES D'UN OBJET	7
FIGURE 3 : PROJECTIONS DE LA PIÈCE	8
FIGURE 4 : LA CORRESPONDANCE EN STÉRÉOVISION	9
FIGURE 5 : ACQUISITION PAR LUMIÈRE CODÉE.....	12
FIGURE 6 : PRINCIPE DE LA TRIANGULATION AU LASER	14
FIGURE 7 : DESCRIPTION DE L'ACQUISITION PAR TRIANGULATION.....	17
FIGURE 8 : EXEMPLE DE MONTAGE (GE LEBLANC)	18
FIGURE 9 : REPRÉSENTATION CONVENTIONNELLE DE LA TRIANGULATION	19
FIGURE 10 : ÉTALONNAGE À PARTIR DE L'EXPRESSION ANALYTIQUE.....	21
FIGURE 11 : BLOC D'ÉTALONNAGE	23
FIGURE 12 : REPRÉSENTATION DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE DANS CE MÉMOIRE.....	25
FIGURE 13 : IMAGES DES HAUTEURS DE RÉFÉRENCE	26
FIGURE 14 : STATISTIQUE COLONNE PAR COLONNE POUR LE NIVEAU Z_0	28
FIGURE 15 : ÉTALONNAGE À PARTIR DE L'APPROCHE PROPOSÉE	29
FIGURE 16 : DIFFÉRENCE ENTRE LES DEUX PLANS D'ÉTALONNAGE	30
FIGURE 17 : CORRECTION SPATIALE	32
FIGURE 18 : BLOC DE TEST	34
FIGURE 19 : DIFFÉRENTS TYPES D'OCCLUSION	36
FIGURE 20 : PRINCIPE DE L'EXTRACTION DU CENTRE DE GRAVITÉ ET DE SON INTENSITÉ ASSOCIÉE.....	38
FIGURE 21 : IMAGE SANS FILTRE.....	40
FIGURE 22 : IMAGE AVEC FILTRE INTERFÉRENTIEL	41
FIGURE 23 : FILTRAGE AVEC UN FILTRE PASSE-BANDE ET UN FILTRE PASSE-HAUT	42
FIGURE 24 : ACQUISITION PARTIELLE	43
FIGURE 25 : ARCHITECTURE GÉNÉRALE.....	46
FIGURE 26 : ARCHITECTURE DU LOGICIEL	48
FIGURE 27 : INTERFACE USAGER (GE LEBLANC).....	49
FIGURE 28 : DESCRIPTION POUR LA SÉPARATION DE LA LONGE DU FLANC.....	51
FIGURE 29: SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA COUPE	53
FIGURE 30 : HISTOGRAMME DES MESURES EFFECTUÉES À L'ÉPAULE.....	54
FIGURE 31 : HISTOGRAMME DES MESURES EFFECTUÉES AU CENTRE.....	54
FIGURE 32 : HISTOGRAMME DES MESURES EFFECTUÉES AU FILET MIGNON.....	55

FIGURE 33 : INSTALLATION (CRIQ).....	60
FIGURE 34 : ROBOT EN ACTION (CRIQ).....	60
FIGURE 35 : IMAGE TOPOLOGIQUE D'UN FLANC DE PORC	61
FIGURE 36 : IMAGE INTENSITÉ DU FLANC DE PORC	61
FIGURE 37 : FLANC DE PORC	62
FIGURE 38 : CÔTE LEVÉE	62
FIGURE 39 : FLANC SCHÉMATIQUE.....	63
FIGURE 40 : DESCRIPTION DE L'ALGORITHME.....	65
FIGURE 41 : SEUILLAGE DU MUSCLE À PARTIR DE L'HISTOGRAMME.	66
FIGURE 42 : HISTOGRAMME DE L'IMAGE PRÉCÉDENTE	67
FIGURE 43 : IMAGE BINARISÉE COMPRENANT L'OBJET ET LE FOND.....	67
FIGURE 44 : FILTRE $F_N(O_N(I_{\text{BINAIRES}}))$	69
FIGURE 45 : FILTRE $O_{N+1}(F_N(I_{\text{BINAIRES}}))$	70
FIGURE 46 : IMAGE DE TOPOLOGIE ORIGINALE.....	71
FIGURE 47 : RÉSULTATS DE L'ALGORITHME DE DETECTION DU CÔTÉ	71
FIGURE 48 : REPRÉSENTATION 3D DE L'ESPACE DE HOUGH	72
FIGURE 49 : EXTRACTION DES MAXIMA LOCAUX DANS L'ESPACE DE HOUGH.....	72
FIGURE 50 : DESCRIPTION DE L'ALGORITHME.....	73
FIGURE 51 : MONTAGE (CRIQ)	76
FIGURE 52 : IMAGE D'INTENSITÉ DE L'ŒIL DE RONDE	76
FIGURE 53 : IMAGE DE TOPOLOGIE DE L'ŒIL DE RONDE	77
FIGURE 54 : CRÉATION DES SECTIONS.....	77
FIGURE 55 : DIFFÉRENTES ÉTAPES DE LA RECONSTRUCTION DE SURFACE.....	79
FIGURE 56 : MAILLAGES ÉLÉMENTAIRES.	82
FIGURE 57 : CONTOURS ET SON GRAPHE TOROÏDAL ORIENTÉ.....	83
FIGURE 58 : CALCUL DE L'ERREUR.	85
FIGURE 59 : ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE DU CÔNE.	87
FIGURE 60 : TRANSFORMATION D'UN GRAPHE TOROÏDALE EN UN GRAPHE PLANAIRE.	88
FIGURE 61 : EXEMPLE DE DEUX CHEMINS DANS DES GRAPHS TOROÏDAL ET PLANAIRE.	89
FIGURE 62 : ORDINOGRAMME.....	90
FIGURE 63 : ÉCRAN DE SAISIE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'ENTRÉES.	92
FIGURE 64 : DONNÉES DE SORTIE DU LOGICIEL.....	93
FIGURE 65 : TEMPS D'EXÉCUTION.....	95
FIGURE 66 : VUE DE CÔTÉ DE LA PIÈCE DANS VRML (MODÈLE FILAIRE).....	96
FIGURE 67 : VUE DE CÔTÉ DE LA PIÈCE DANS VRML (MODÈLE SURFACIQUE).....	97

FIGURE 68 : APPROCHE CONVENTIONNELLE	101
FIGURE 69 : APPROCHE PROPOSÉE	106

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

Distance du centre optique à l'origine du laser	d
Distance du centre optique à l'objet	OD
Distance du centre optique au centre du capteur matriciel	ID
Distance inter pixel	px,py
Angle de projection du laser	θ
Longueur focale	f
Grossissement	m
Hauteur réelle	Z
Hauteur réelle minimale	Z_o
Hauteur réelle maximale	Z_h
Position réelle pour une hauteur Z	X
Position réelle pour la hauteur minimale ou d'origine	X_o
Position réelle pour la hauteur maximale	X_h
Position réelle du centre optique	X_c
Position réelle projetée sur le CCD pour une hauteur Z	x
Position réelle projetée sur le CCD pour la hauteur minimale	x_o
Position réelle projetée sur le CCD pour la hauteur maximale	x_h
Position réelle projetée sur le CCD du centre optique	x_c
Position observée sur le CCD pour une hauteur Z	x',s
Distance d'échantillonnage entre deux images consécutives	dy

INTRODUCTION

Ces dernières années, l'industrie du porc a connu une phase de développement importante dans les domaines du transport, de l'abattage et de la génétique [TEE98]. La découpe, quant à elle connaît un développement lent. Si le positionnement semi, voire complètement automatique s'est développé de façon considérable, cette industrie repose cependant encore essentiellement sur la présence humaine. Face à l'augmentation des cadences de production, due à une demande sans cesse croissante d'une meilleure qualité des produits, à la pénurie de main d'œuvre qualifiée, aux conditions difficiles de travail ainsi qu'aux risques d'accident, les compagnies exercent une pression de plus en plus forte pour une automatisation complète des procédés et des différents postes de travail.

L'amélioration des technologies ces dernières années ainsi que la diminution de leur coût ont permis d'entreprendre des recherches sur l'automatisation de certains postes de travail dans une usine de découpe de porcs en vue de développer des solutions viables pour l'industrie. La tâche est complexe car la nature même de la matière introduit une grande variabilité en grandeur, en couleur et en forme. De plus, les découpes réalisées en amont sur la chaîne de production peuvent altérer la qualité du produit qui se présente au poste de travail à automatiser. En effet, la pièce peut avoir été mal manipulée et certaines parties enlevées pour des risques de contamination bactériologique par exemple, ou tout simplement les coupes précédentes ont été mal effectuées. La température de stockage de la carcasse fait que la viande a un taux d'humidité variable. Sa rigidité fluctue, ce qui conduit à une difficulté supplémentaire pour certains types de découpe. L'ensemble de ces changements, qu'ils proviennent de la matière même ou des procédés mis en place à l'abattage et à la découpe, impliquent que le système d'automatisation soit adaptatif, c'est-à-dire que la mécanique, l'automatisation ainsi que le système de reconnaissance et de décision doivent gérer beaucoup de cas et fournir une réponse déterministe. De plus,

cette industrie repose sur la qualité de la coupe ainsi que sur sa constance. Pour être profitable, la machine doit être capable de fournir cette précision et cette répétitivité malgré la variabilité du produit. En plus, pour une même station de travail, la machine doit être capable de réaliser plusieurs types de produit.

Dans ce mémoire, seul le problème de l'automatisation de la découpe de pièces de viande est abordé. L'aspect mécanique, les asservissements et les contrôles à effectuer aux postes de travail ne seront pas couverts dans ce travail.

Pour résoudre les contraintes mentionnées précédemment, la vision artificielle a été retenue comme technologie car, dans le domaine alimentaire, elle possède un triple objectif :

- a) Effectuer un remplacement au sens strict de l'œil humain pour la détection de défauts ou pour des opérations d'étalonnage ;
- b) Dépasser la réponse de l'œil humain par l'utilisation de systèmes plus précis et plus rapides ou par l'emploi de capteurs faisant appel à des ondes non-visibles comme l'infrarouge ;
- c) Intégrer une faculté visuelle au procédé même. Ceci fait référence à des tâches plus complexes où la vision humaine est couplée à une manipulation du produit pour effectuer une action précise. Les postes de travail répondent bien à ce critère.

Pour ce type d'industrie, la vision artificielle 3D a été retenue comme technologie pour l'acquisition des données, l'extraction et la reconnaissance de l'information. Ce mémoire a pour but de présenter un tel système.

Ce travail consiste à présenter un système d'acquisition 3D qui soit capable de fournir la plus grande collection d'information possible à la résolution désirée tout en respectant

des vitesses de production qui peuvent aller du simple au double pour le même type de poste, mais dans des usines différentes. Les données acquises par ce système sont de nature spatiale et topologique pour pouvoir répondre adéquatement à la complexité des tâches effectuées au poste de travail.

Généralement, les algorithmes de vision doivent localiser certaines parties de la pièce ou tout simplement discriminer une pièce gauche d'une droite. Pour ce faire, une image d'intensité² doit être fournie pour différencier par exemple le gras du muscle. En même temps, l'information sur les hauteurs doit être mise en correspondance avec les parties localisées dans l'image d'intensité 2D. Donc une dimension supplémentaire doit être ajoutée pour pouvoir réaliser l'opération de découpe associée à la station de travail, à savoir une séparation de la longe du flanc par exemple ou tout simplement un dégraissage. Les algorithmes pourront corréliser l'information 3D avec la texture pour trouver les éléments d'informations de l'opération et ainsi générer une trajectoire de coupe.

La technologie retenue pour fournir cette information multi-sensorielle doit s'adapter aux différentes opérations de coupe possibles pour minimiser le coût de développement. Ceci implique que le champ de vue et la résolution peuvent changer, d'où la nécessité d'utiliser des optiques et des caméras différentes. Donc, l'électronique, l'optique ainsi que le logiciel utilisés pour l'acquisition et le traitement de données doivent être configurables.

La vitesse d'acquisition d'un tel système est fonction de la cadence de production qui peut être rencontrée dans l'industrie. Il doit donc respecter les temps de cycle, ce qui

² Il s'agit d'une image en niveaux de gris générée à partir de la réflexion du laser. Cette image ne correspond pas à la mesure traditionnelle de l'éclairement reçu par la scène et capté par la caméra. À partir de maintenant, l'utilisation du terme « image d'intensité » réfère à cette définition.

conduit à la nécessité d'une flexibilité mécanique quant à l'installation physique d'un système général sur la ligne de production. Actuellement la découpe la plus rapide produit environ 1200 porcs/heure. Les données suivantes (Tableau 1) contiennent les diverses cadences de production et la vitesse linéaire associée pour des pièces séparées centre à centre de quarante pouces³ (1,016 m).

Production (longes/heure)	Vitesse (mm/s)	Temps de cycle (s)
600	169,33	6
700	197,6	5,14
800	225,8	4,5
900	254	4
1000	282,2	3,6
1100	310,4	3,27
1200	338,7	3
1300	366,9	2,77
1400	395,1	2,57
1500	423,3	2,4
1600	451,6	2,25
1700	479,8	2,12
1800	508	2
1900	536,2	1,89
2000	564,4	1,8

Tableau 1 : Temps de cycle

³ Les dimensions relatives à l'industrie alimentaire sont toujours en pouce. Pour une meilleure compréhension, ces mesures sont maintenues volontairement dans les unités du système impérial.

Cette distance représente la longueur moyenne de la pièce qui est de trente pouces (76,2 cm) et l'espacement entre les longues, lequel est de dix pouces (25,4 cm). Il est à noter que le positionnement est manuel ce qui conduit à des variations sensibles des espacements imposant une fluctuation des temps de cycle. Le système automatisé doit donc être capable de maintenir une cadence beaucoup plus importante que la production moyenne.

Cet exposé débute par une revue de littérature sur les différentes technologies pour créer des images 3D, et apporte une explication sur le choix de la triangulation au laser dans le contexte de notre domaine d'applications.

La phase de conception commence par une présentation des objectifs techniques du système de triangulation au laser. La Figure 1 indique dans les boîtes blanches les objectifs et dans les rectangles grisés leurs solutions. Les flèches décrivent les correspondances entre les objectifs et les solutions proposées. La seconde étape couvre les différents aspects techniques, à savoir mécanique, optique et électronique. Premièrement, une formulation du calcul de la hauteur pour l'approche proposée est mise en avant par rapport à la formulation plus conventionnelle. Deuxièmement, l'étalonnage du système ainsi que la répétitivité et la précision obtenues grâce à cette méthode sont présentés. Pour finir une brève description de l'implantation du système est faite. Il est à noter que la séparation de la longe du flanc selon le procédé canadien sera utilisée à titre d'exemple tout au long de ce chapitre.

Pour valider notre développement ainsi que pour expliquer sa pertinence dans l'environnement de travail qui lui est destiné, à savoir la découpe de viandes, diverses applications qui utilisent cette technologie vont être présentées. Premièrement, l'application de la séparation de la longe du flanc est décrite pour valider la précision que cette technologie peut offrir dans le cadre d'une machine de production. Deuxièmement, l'application du levage du flanc est présentée pour montrer l'importance

de générer des images de topologie et d'intensité. La fusion des données permet entre autre la discrimination des flancs gauche et droit. Enfin, l'application de dégraissage de l'œil de ronde est une preuve de faisabilité de la possibilité d'utiliser notre développement pour résoudre des tâches complexes en trois dimensions. En effet, l'acquisition par triangulation au laser permet de construire un modèle 3D dans le but d'optimiser les trajectoires de coupe pour le dégraissage.

En conclusion, la pertinence de cette technologie est présentée comprenant les avantages, les limitations et les améliorations à apporter.

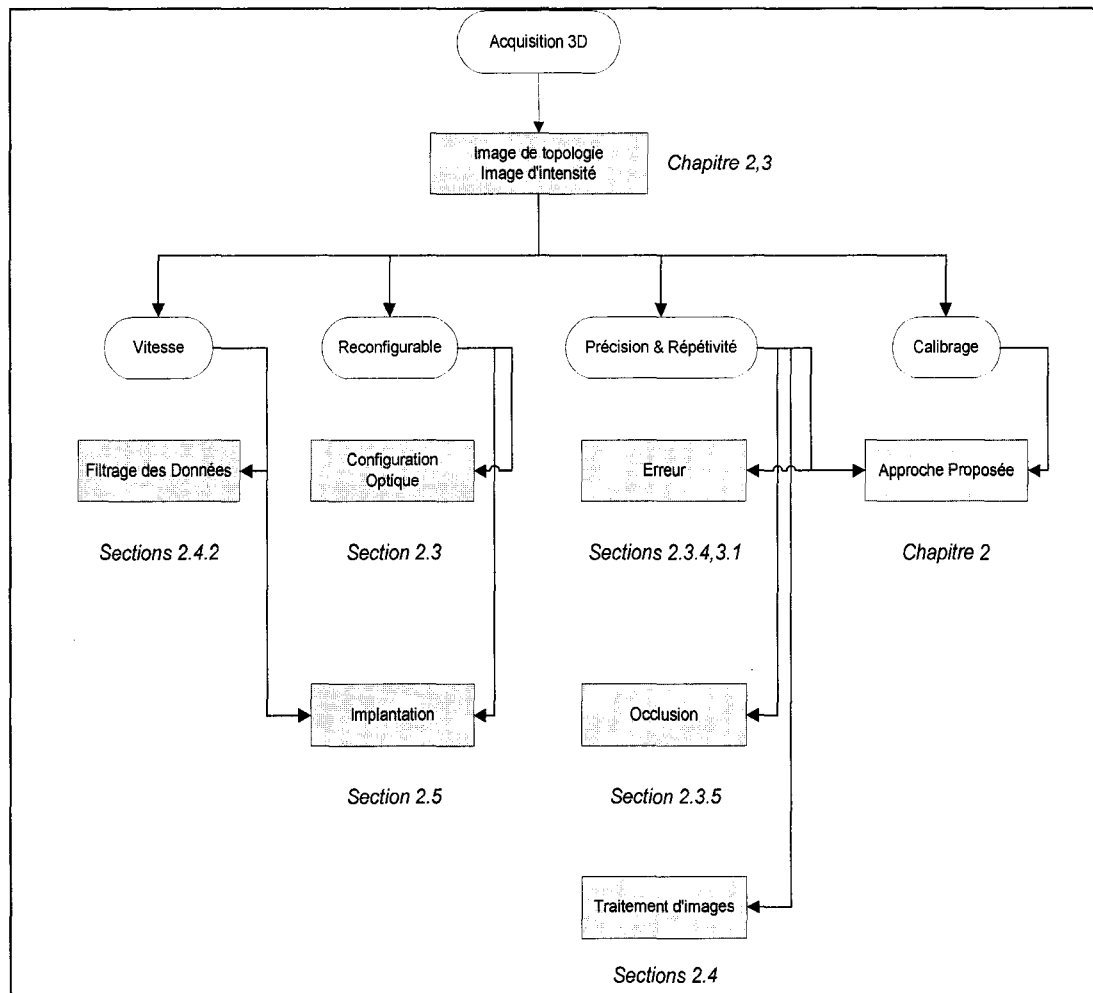


Figure 1 : Schéma synoptique du système préconisé.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Définition du terme 3D

Dans le but de simplifier notre développement ainsi que la compréhension générale du texte, la définition du terme 3D utilisé dans le reste du document est donnée dans cette section.

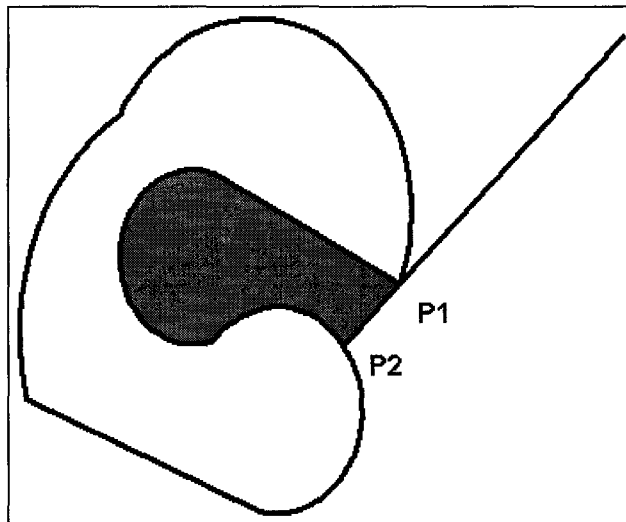


Figure 2 : Surfaces visibles d'un objet

La reconstruction d'un objet 3D à partir de vues 2D est seulement possible pour les parties visibles de cet objet. Une pièce est dite entièrement visible de l'extérieur s'il existe un rayon à chaque point P de la surface qui rencontre celle-ci seulement à ce point P [KLE98]. La Figure 2 montre un rayon qui rencontre la surface en deux points P₁ et

P_2 . L'objet n'est donc pas entièrement visible, ce qui introduit la notion de pièce convexe.

La pièce est donc projetée selon une ou plusieurs directions (Figure 3). Par conséquent, elle ne peut être interprétée que comme un objet $2^{1/2}D^4$ lors de la reconstruction de surface, car cette opération n'utilise seulement qu'un nombre restreint de projections.

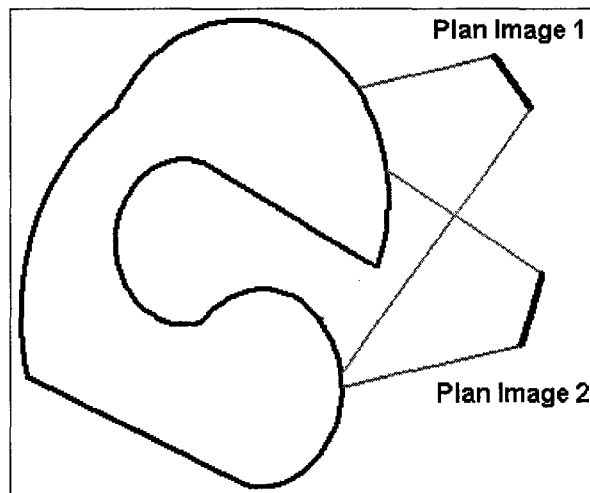


Figure 3 : Projections de la pièce

1.2 Techniques d'acquisition 3D

Les images 3D peuvent être obtenues de diverses façons [TRU98], [JAI95], [JAR83]. Il existe deux grandes classes de système d'acquisition : actif ou passif. Pour ce dernier type, aucun éclairage spécialisé n'est employé.

⁴ Le terme « $2^{1/2}D$ » décrit une information spatiale 3D incomplète

La méthode passive, la plus connue, est la stéréovision [HOR96], [SHI87], [FAU93], [AYA87] où au moins deux images sont prises à des angles de vues différents. La mise en correspondance des points dans ces images permet une reconstruction 3D connaissant la structure géométrique du système d'acquisition. La difficulté de cette méthode dans le contexte des applications à développer réside dans la mise en correspondance. En effet, cette dernière nécessite des textures d'objet très marquées pour faire une bonne corrélation.

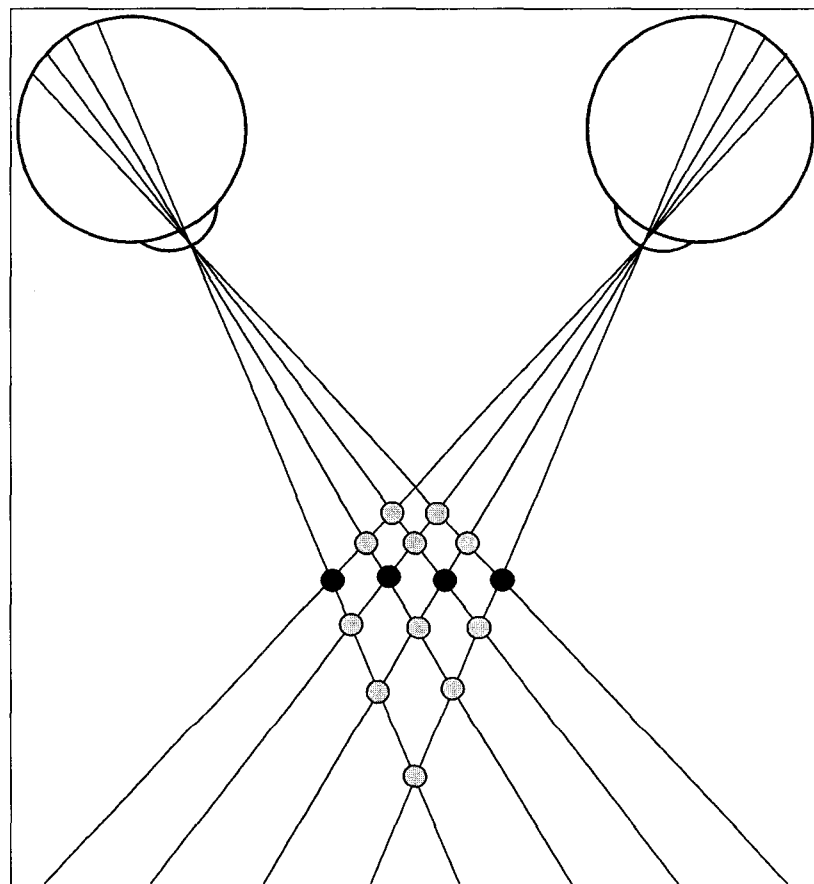


Figure 4 : La correspondance en stéréovision

La Figure 4 montre l’ambiguïté de la correspondance entre deux projections rétiniennes [MAR76]. Chacun des quatre points pour une vue doit être associé avec les quatre points de l’autre vue. Parmi les 16 combinaisons possibles, quatre sont valables (cercles noirs) et 12 sont incorrectes (cercles gris). Sans l’apport de connaissances a priori, de telles ambiguïtés ne seraient pas résolues. Or la plupart du temps, l’information à numériser n’est pas assez structurée à cause de la variabilité du produit et de la présence d’artéfacts. Ensuite, le temps pour faire la mise en correspondance respecterait difficilement les temps de cycle mentionnés au chapitre précédent (Tableau 1). De plus, les pièces de viande sont mobiles ce qui nécessite une électronique de déclenchement spécial pour synchroniser les prises de vues.

En conclusion, la méthode passive n’est pas adaptée à nos besoins. Pour cette raison, le système d’acquisition 3D retenu est actif, c’est-à-dire qu’en conjonction avec une caméra, un éclairage structuré est utilisé. Une lumière connue et bien définie est dite « structurée ». Des discussions au sujet de différentes méthodes ont été présentées dans divers articles [BES88], [POU89].

Une des méthodes actives connues est le LIDAR (« *Light Detection And Ranging* ») où le temps de parcours d’une lumière pulsée est mesuré. Même si cette technologie est utilisée avec succès en télédétection cependant elle s’adapte mal aux types d’applications mentionnées dans ce travail car la vitesse des photons qui est très

importante ne permet pas une grande résolution, c'est-à-dire que de faibles variations de distances conduisent à d'infimes variations en temps. Les autres méthodes examinées dans cette revue de littérature sont basées sur la triangulation :

- a. Balayage avec une lumière codée en niveau de gris ;
- b. Balayage avec un point lumineux ;
- c. Balayage avec une ligne lumineuse.

1.3 Méthode active : Balayage avec une lumière codée en niveau de gris

Parmi les trois méthodes énumérées précédemment, la première approche [YE96] consiste à illuminer la scène avec des patrons de lumière qui génèrent des combinaisons de niveaux de gris. La Figure 5 représente un exemple d'acquisition avec un codage de Gray⁵. Par exemple, un projecteur qui émet huit lignes nécessite de numériser dans le temps trois images pour la reconstruction 3D de la scène. L'avantage de cette technique est que le système d'acquisition a besoin de moins d'images pour pouvoir construire la représentation 3D. Pour construire une image de dimension $N \times M$, le balayage avec lumière codée nécessite donc $\log_2 N$ acquisitions. Cependant, l'éclairage est peu puissant au regard des temps d'exposition que nécessitent les applications présentées dans ce mémoire. De plus, certaines erreurs sont introduites quand les objets se déplacent car le

⁵ Codage de gray : La distance de Hamming vaut 1, c'est à dire qu'entre deux mots consécutifs un seul bit change.

M acquisitions d'images. Malheureusement, cette technique est relativement complexe à mettre en œuvre. Cette méthode nécessite la synchronisation d'au moins deux miroirs et impose que le capteur soit incliner pour compenser la défocalisation. Cet ajout de composantes mobiles diminue la fiabilité de la tête optique et rend plus complexe l'implantation mécanique. La vitesse maximale d'acquisition d'un tel système est de 20kHz [VIS98]. Cette cadence n'est pas suffisante pour le type d'applications qui sont ciblées dans ce travail.

1.5 Méthode active : Balayage avec une ligne lumineuse

La méthode retenue dans le cadre des applications ciblées est la triangulation avec une ligne laser [BLA88], [BLA92], [MUN87]. La position de la lumière réfléchi sur le senseur photosensible dépend de la distance entre l'objet et la source de la lumière. Connaissant la relation géométrique entre le laser, le centre optique et la direction du faisceau lumineux, la hauteur de l'objet peut être déterminée. Dans la Figure 6, la partie centrale montre comment la ligne laser se déforme avec les variations de hauteur. La partie la plus à gauche montre que la réflexion du laser sur l'objet à différentes hauteurs se retrouve à des positions différentes sur le capteur. La partie la plus à droite de la figure montre le profil généré par la réflexion du laser sur l'objet. Cette image acquise par la caméra matricielle est ensuite analysée pour extraire l'information de hauteur à partir de la connaissance géométrique du système. La totalité de l'objet à numériser peut être obtenue en déplaçant celui-ci sous la tête optique ou vice versa, c'est à dire que l'objet est statique et la caméra mobile. Dans le contexte de ce mémoire, la première technique est retenue. Pour numériser une image de dimension $N \times M$, cette méthode requiert M acquisitions.

Dans [DEB97], le système commercial proposé atteint 180 000 points par seconde. Comme on le verra ultérieurement, le système développé dans ce mémoire est capable

de numériser des images à une cadence approchant celle de ce système dédié tout en n'utilisant que des équipements standards.

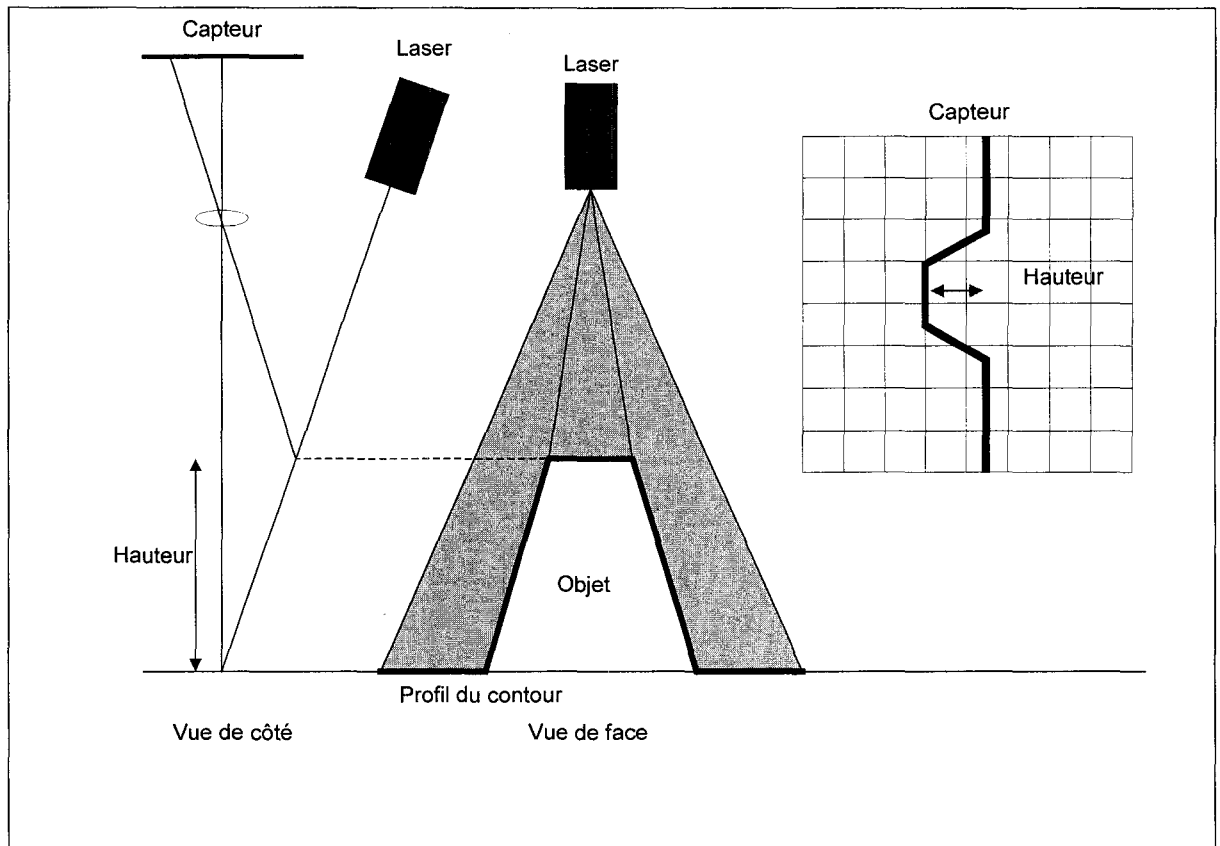


Figure 6 : Principe de la triangulation au laser

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Introduction

Ce chapitre présente l'approche utilisée pour la réalisation d'un système d'acquisition 3D. En premier, le principe de la triangulation au laser est décrit dans le cadre des applications industrielles mentionnées dans ce rapport. Ensuite, une présentation de la formulation classique est faite suivie de la description de l'approche utilisée. Ainsi, la mise en équation, l'étalonnage, les corrections de position ainsi que l'erreur de mesures du système proposé sont décrits. La localisation du point laser ainsi que les diverses techniques de filtrage employées sont aussi abordées. Pour finir, une brève description de l'implantation du système est faite.

2.2 Principe

La Figure 7 décrit le principe du système d'acquisition. L'image i correspond au laser à la position i à un instant donné. Un objet passant sous la ligne du laser déforme cette dernière. La réflexion de la lumière est alors captée par la caméra. La position instantanée de la ligne laser dans l'image numérisée est analysée. Chaque position donne une hauteur qui dépend de la géométrie de la tête optique, à savoir l'ensemble caméra et laser. L'objet est ainsi sectionné en N profils, donc en autant d'images. Cette opération est effectuée en déplaçant l'objet à numériser sur un convoyeur. La ligne laser permet de numériser complètement M points dans une direction transversale au déplacement de l'objet tandis que le sectionnement permet d'obtenir l'information dans le sens de déplacement de l'objet qui est perpendiculaire à la ligne laser. L'espacement entre

l'acquisition de deux images consécutives définit la résolution spatiale longitudinale, c'est à dire selon l'axe des y_m du référentiel universel (ou du monde) F_m . La distance entre deux pixels consécutifs selon l'axe des x_m définit la résolution spatiale latérale. Ces résolutions génèrent la densité de points que va numériser notre système. La conjugaison de ces deux axes d'acquisitions permet de couvrir la surface complète de l'objet. Le nombre de points obtenus est $M \times N$. Le système d'acquisition est composé d'une caméra et d'un laser qui sont montés sur un ensemble mécanique. Ce dernier doit fournir certains degrés de liberté pour permettre divers ajustements, l'acquisition à différentes résolutions mais aussi pour rendre certains alignements possibles. Une carte d'acquisition est installée dans un PC industriel pour la numérisation des N images. Une correction spatiale des points aux coordonnées (x_m, y_m) peut être nécessaire selon la position de la caméra.

L'algorithme d'acquisition consiste à numériser l'image i tandis qu'en parallèle le PC s'occupe de transférer l'image $i-1$ déjà numérisée en mémoire vive de l'ordinateur via le bus PCI⁶. Après le transfert de l'image, le profil de l'objet (ligne laser) est analysé. Pour chaque ligne de l'image, la position du profil est extraite au moyen du centre de gravité. Ensuite, les positions du profil ainsi que leur intensité servent à la construction des images de destination. Comme indiqué dans l'introduction, le système de vision doit fournir deux sources d'information jugées nécessaires pour réaliser les applications mentionnées dans ce mémoire. La première est une image de topologie telle que montrée dans la Figure 7. Son objectif principal est de fournir l'information 3D qui permet ensuite de générer une trajectoire, laquelle est transmise à un outil de coupe. Plus la valeur numérique à une position (x, y) dans cette image est élevée, plus la hauteur de l'objet à cette même position est importante. La seconde source est une image d'intensité qui contient la réflexion du laser à proprement dit pour former une image standard en niveaux de gris.

⁶ PCI : « Peripheral Component Interconnect »

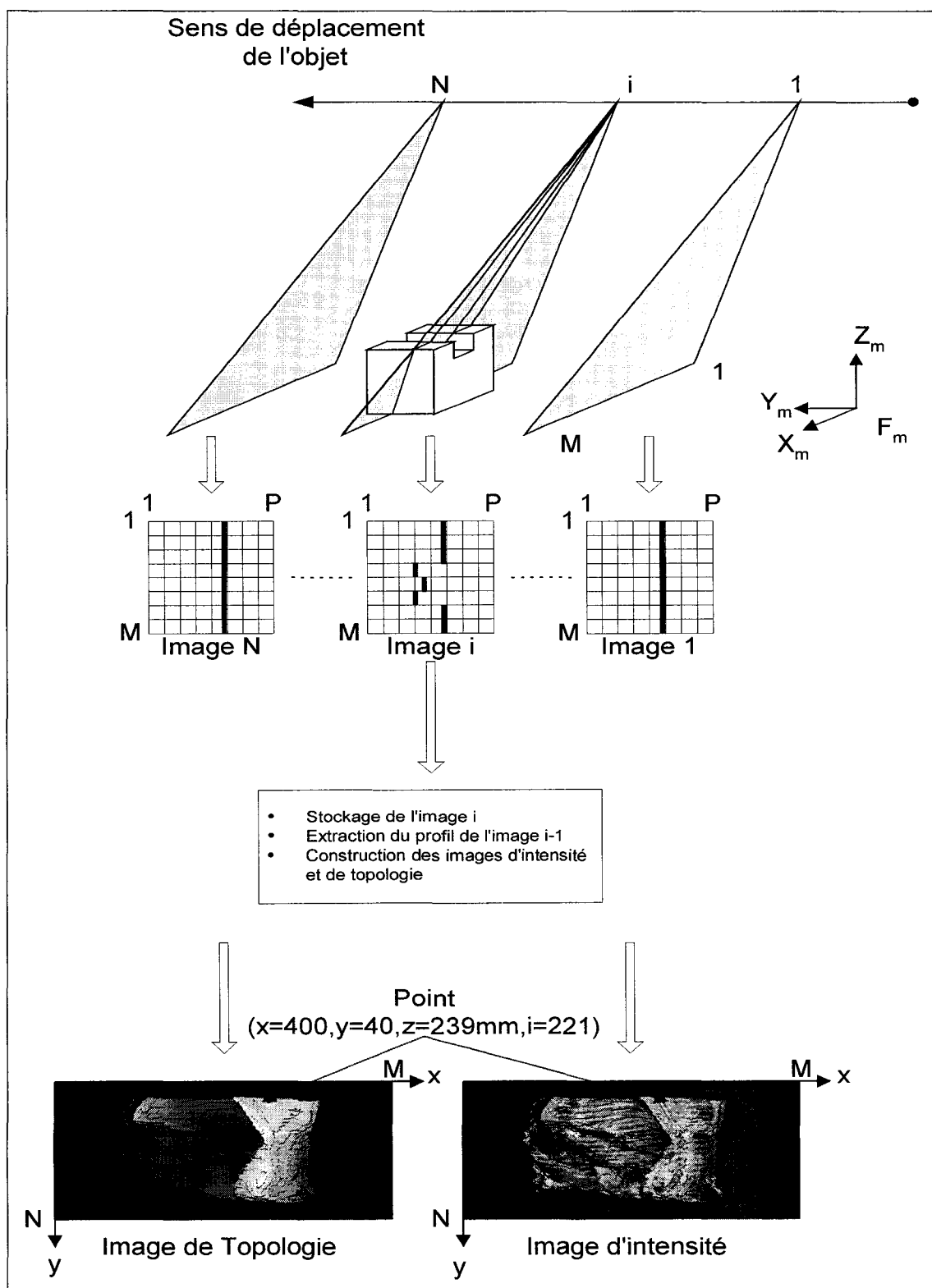


Figure 7 : Description de l'acquisition par triangulation

Son objectif principal est de permettre de discriminer certains éléments de la pièce de viande. Dans la Figure 7, les parties foncées correspondent à du muscle tandis que les parties blanches représentent du gras ou de la panne⁷.

2.3 Configuration optique

La Figure 8 est une photographie d'un montage opto-mécanique pour numériser des flancs de porc. Le laser est situé dans la partie gauche de l'image tandis que la caméra est à droite. L'ensemble est ajustable en translation. De plus, l'attache du laser contient un pivot pour pouvoir ajuster le laser à la résolution nécessaire pour l'application et faciliter les alignements requis par l'étalonnage.

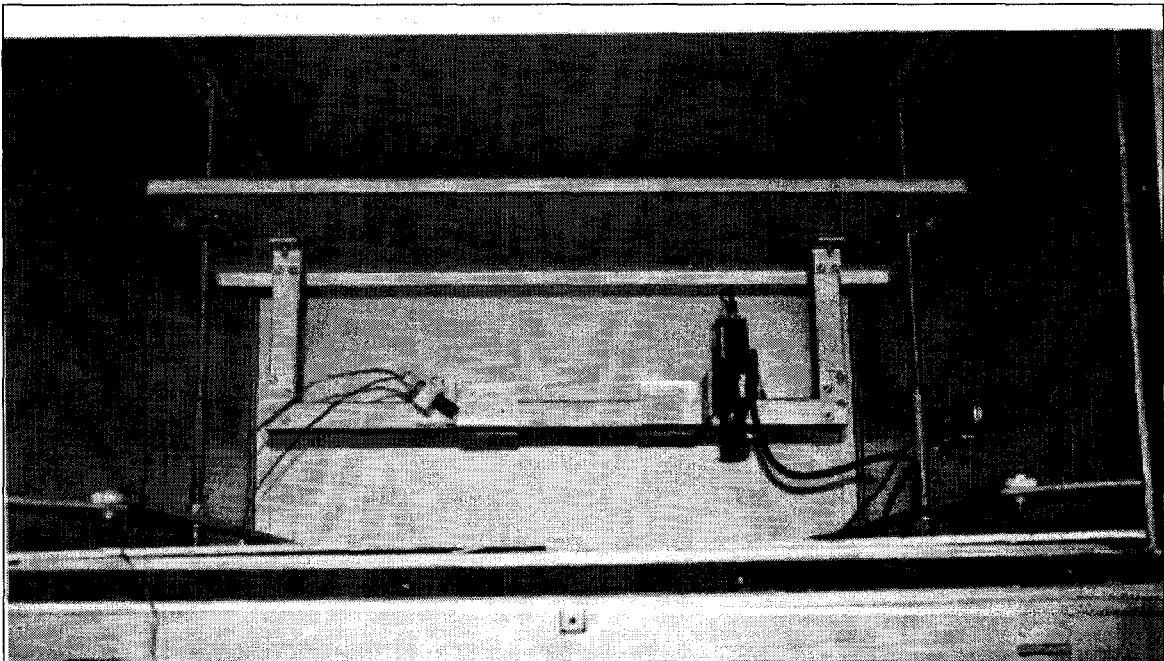


Figure 8 : Exemple de montage (GE Leblanc)

⁷ Graisse qui se trouve sous la peau du cochon.

2.3.1 Équations conventionnelles du système

La Figure 9 montre la relation géométrique telle que présentée normalement pour un système d'acquisition. Le laser est projeté selon un angle θ . La réflexion de la lumière structurée sur la scène est captée par la caméra (plan image).

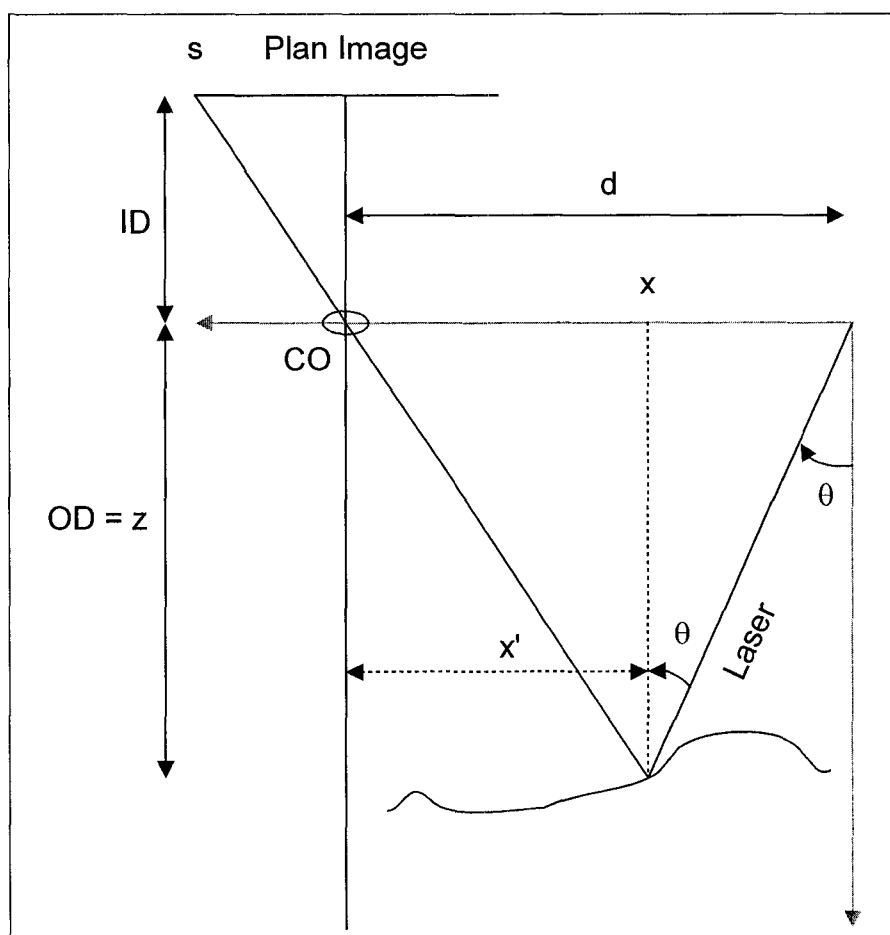


Figure 9 : Représentation conventionnelle de la triangulation

Connaissant les diverses relations géométriques entre le laser, l'objet et la caméra, une équation peut être obtenue pour déterminer la hauteur z [Bla88]. Cette relation, démontrée dans l'annexe 1, est donnée par l'équation suivante :

$$z = \frac{f(d + s)}{s + f \tan \theta} \quad (2-1)$$

avec :

- f : distance focale ;
- s : position du pixel sur le capteur ;
- d : distance entre le centre optique et le laser ;
- θ : angle de projection du laser.

Les hypothèses suivantes ont été faites pour obtenir cette relation:

- a. La géométrie avec un sténopé a été retenue ;
- b. La lentille est modélisée par une lentille mince ;
- c. Le centre optique est placé au centre physique du capteur ;
- d. La lentille ne possède pas de distorsions radiales et longitudinales ;
- e. La distance focale f est négligeable par rapport à la distance OD ;

Pour étalonner le système d'acquisition, il faut connaître le paramètre optique f et les deux paramètres mécaniques d et θ . Ainsi en utilisant l'expression (2-1), la position s sur le capteur permet de connaître la hauteur réelle z . Par exemple, l'application de séparation de la longe du flanc a la configuration suivante :

- a. $f = 6 \text{ mm}$;

- b. $d = 320 \text{ mm}$;
- c. $\theta = 33 \text{ degrés}$.

Le plan d'étalonnage pour ces paramètres est représenté à la Figure 10. Chaque pixel du capteur matriciel fournit une hauteur, c'est à dire qu'à chaque position (x, y) correspond une valeur Z qui est la hauteur dans le monde réel.

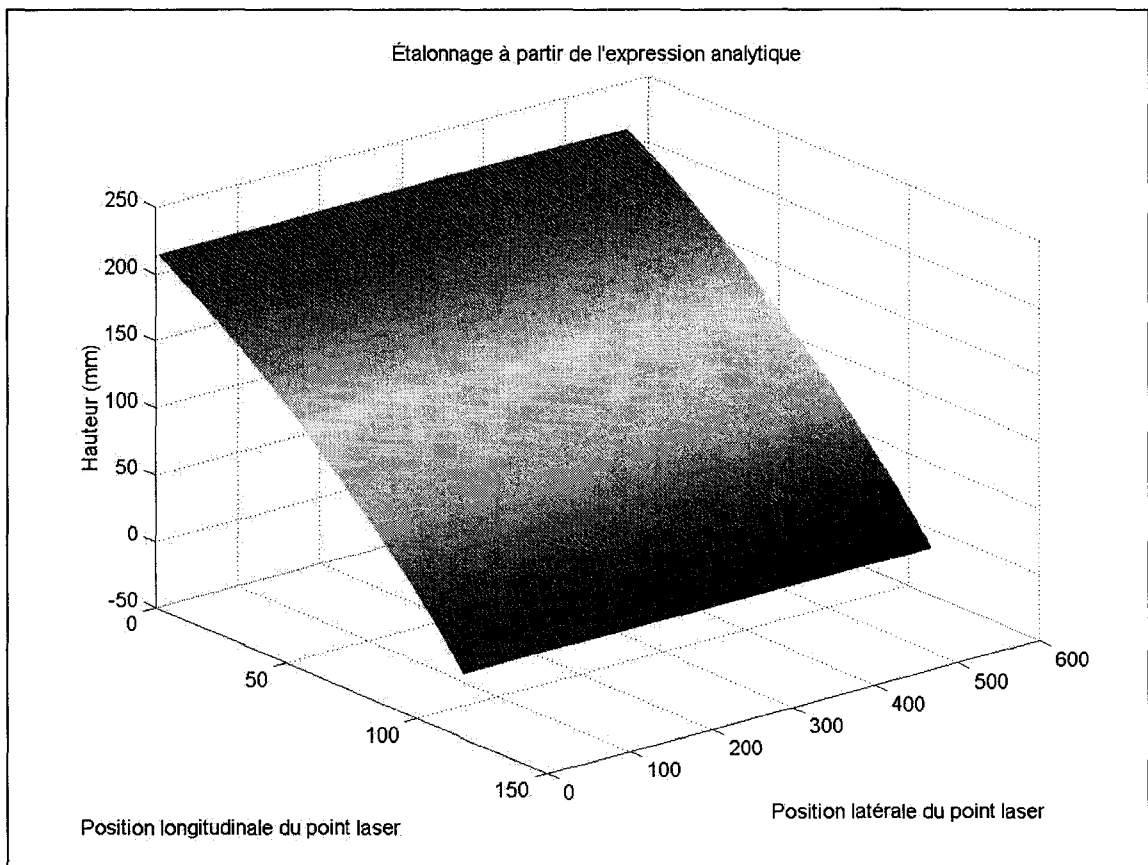


Figure 10 : Étalonnage à partir de l'expression analytique

L'équation comporte trois variables à savoir f , d et θ . La méthode directe consisterait à fournir une valeur numérique pour ces paramètres et à utiliser l'expression analytique. La prise des mesures pour les paramètres mécaniques d et θ reste toutefois difficile. De plus, les incertitudes du système liées aux tolérances appliquées aux valeurs nominales

ainsi qu'aux erreurs de prise de mesures ne sont pas prises en compte. Une approche classique est de créer une table de conversion avec pour valeur de sortie une hauteur z [THE93]. Le nombre d'éléments de cette table correspond à diverses hauteurs où la ligne laser a été mémorisée. Une interpolation est nécessaire pour les positions s qui se trouvent entre deux hauteurs connues. De plus, toute modification aussi bien mécanique qu'optique entraîne une reconstruction de la table. Il va de soi que la précision est facteur du nombre de hauteurs utilisées.

Le développement d'une nouvelle méthode d'étalonnage pour le système d'acquisition devait répondre aux critères suivants :

- a. Efficacité : c'est à dire que le temps d'étalonnage et la précision du système restent acceptables ;
- b. Étalonnage automatique : c'est à dire ne nécessitant pas l'intervention d'un opérateur ;
- c. Flexibilité : c'est à dire que le changement des paramètres optique et mécanique doit être transparent.

La méthode proposée consiste à mesurer la hauteur Z_c du centre optique de la lentille par rapport au convoyeur et de fournir deux hauteurs de référence Z_o et Z_h qui correspondent respectivement à une hauteur minimale et maximale. L'avantage est que l'on peut mesurer facilement cette nouvelle hauteur Z_c et que le système d'acquisition peut comporter un bloc d'étalonnage prenant en compte les deux références Z_o et Z_h ainsi que le dimensionnement du pixel. Avec ces trois nouveaux paramètres, une nouvelle expression analytique est formulée pour le calcul de la hauteur. Cette équation prend en compte l'incertitude quant aux tolérances sur les valeurs nominales. De plus, les prises de mesures sont plus faciles. Le bloc permet aussi un étalonnage automatique.

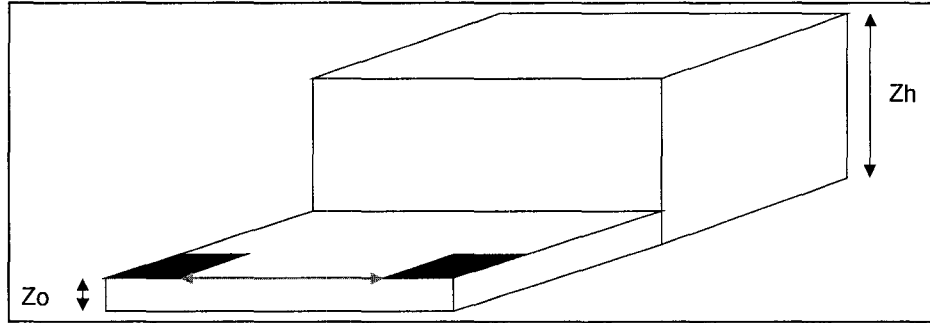


Figure 11 : Bloc d'étalonnage

2.3.2 Équations du système proposé

La Figure 12 montre la relation géométrique du montage opto-mécanique du système d'acquisition telle que proposée dans ce mémoire. La relation entre la hauteur z et la position de la ligne laser sur le capteur matriciel est maintenant développée.

La première transformation concerne le passage du plan image au plan objet :

$$p_x = \frac{x - x_c}{x' - x'_c} \quad (2-2)$$

d'où

$$x = p_x (x' - x'_c) + x_c \quad (2-3)$$

avec :

- x : position réelle projetée sur le capteur matriciel pour une hauteur z ;
- x_c : position réelle projetée du centre optique ;
- x' : position observée sur le capteur matriciel pour une hauteur z ;
- x'_c : position observée du centre optique ;
- p_x : taille du pixel en x .

Toutes les coordonnées en x correspondent aux positions réelles projetées. Dans l'annexe 2, la relation suivante entre la hauteur réelle Z et cette position x a été établie :

$$Z = \frac{\alpha x + \beta}{x + \lambda} \quad (2-4)$$

avec :

$$\alpha = \frac{Z_h Z_c}{Z_h - Z_o} \quad (2-5)$$

et :

$$\beta = \frac{x_h(Z_o Z_c - Z_o Z_h) + x_o(Z_o Z_h - Z_h Z_c)}{Z_h - Z_o} \quad (2-6)$$

$$\lambda = \frac{x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)}{Z_h - Z_o} \quad (2-7)$$

L'équation analytique de la hauteur n'est pas linéaire, ce qui confirme qu'une interpolation linéaire entre les deux hauteurs de référence serait une mauvaise approche. La Figure 10 confirme graphiquement cette non-linéarité.

La hauteur Z_c est donnée par la distance entre la hauteur de référence Z_o et la surface de la bride. À cette valeur, on soustrait la distance entre la bride et le point focal (soit 17,526 mm pour une lentille de type C) et la distance focale f .

La procédure d'étalonnage consiste à utiliser deux hauteurs de référence Z_o et Z_h . La première étape est de numériser des images de la ligne laser pour ces deux hauteurs de référence Z_o et Z_h et d'analyser leur position respective x_o et x_h sur le capteur matriciel. Ensuite, les paramètres α , β et λ sont calculés en utilisant les équations précédentes. L'équation de la hauteur (2-4) est donc entièrement déterminée et sert à la définition du plan d'étalonnage. Le montage opto-mécanique servant à tester la méthode d'étalonnage

Pour cette application, le convoyeur de transport des pièces de viande n'est pas assez large pour le champ de vue de la caméra car le centre optique est aligné sur la ligne de coupe moyenne. Pour cette raison, les images (Figure 13) des hauteurs produites ne contiennent pas d'informations dans leur partie gauche. Il est à noter que la bande sur la gauche correspond au rail des cellules photoélectriques. Les algorithmes ont quant à eux la capacité de traiter des zones d'intérêt au niveau de l'étalonnage et de l'acquisition, ce qui permet de gérer ce genre d'artéfacts.

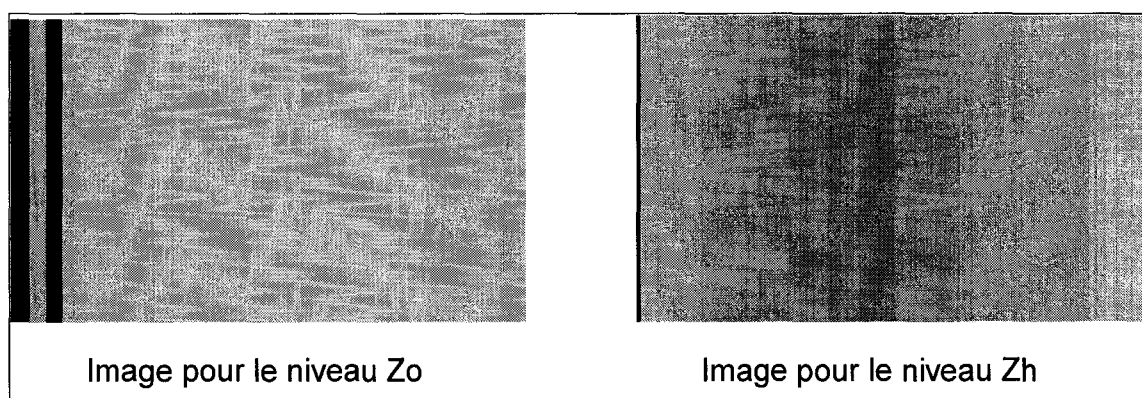


Figure 13 : Images des hauteurs de référence

Le bloc d'étalonnage ne bouge pas. L'acquisition statique de 242 profils permet alors de générer les images de la Figure 13. Une analyse statistique donne les résultats suivants pour l'ensemble de l'image :

Hauteurs	Moyenne (pixel)	Ecart-type (pixel)
Z_o	161,96	0,85
Z_h	48,71	0,51

Tableau 2 : Statistiques globales

Les résultats sur l'image complète, bien qu'intéressants, ne sont pas significatifs. En effet la ligne laser n'est pas une ligne droite parfaite dans l'image ce qui explique les écarts types trouvés dans la Tableau 2. Le premier graphique dans la Figure 14 représente le profil moyen pour la hauteur Z_o . La non-rectitude de la ligne est due à :

- a. La précision mécanique qui ne permet pas toujours d'aligner parfaitement la ligne laser aux extrémités (Figure 14) du capteur matriciel pour les deux lignes de référence. Une rotation autour de l'axe de projection du laser cause cet effet.
- b. La distorsion optique qui introduit une non-linéarité de la ligne comme le montre la Figure 14.
- c. La qualité de la ligne laser qui se doit d'être de largeur constante.

Le principe de la méthode proposée pour calibrer le système d'acquisition est d'utiliser deux profils générés pour des hauteurs différentes et d'interpoler le plan d'étalonnage en utilisant l'équation (2-4). Pour palier à la non-rectitude de la ligne laser, l'équation (2-4) est alors utilisée pour chaque colonne de l'image. Ainsi, les positions x_o et x_h des lignes laser sur la colonne associées respectivement aux hauteurs Z_o et Z_h permettent de générer les paramètres α , β et λ . Donc pour chaque colonne de l'image, une équation (2-4) est associée. Cette dernière permet de connaître pour chaque position de la ligne laser sur cette colonne la hauteur z associée. Cette méthode a l'avantage de ne mémoriser que trois paramètres par colonne et d'éviter le stockage d'une table de conversion. En effet, l'utilisation de l'équation donne directement la hauteur.

La deuxième courbe dans la Figure 14 donne les écarts-types pour chaque colonne de l'image. Les résultats sont acceptables puisque l'écart type maximal est de 0,22 pixel.

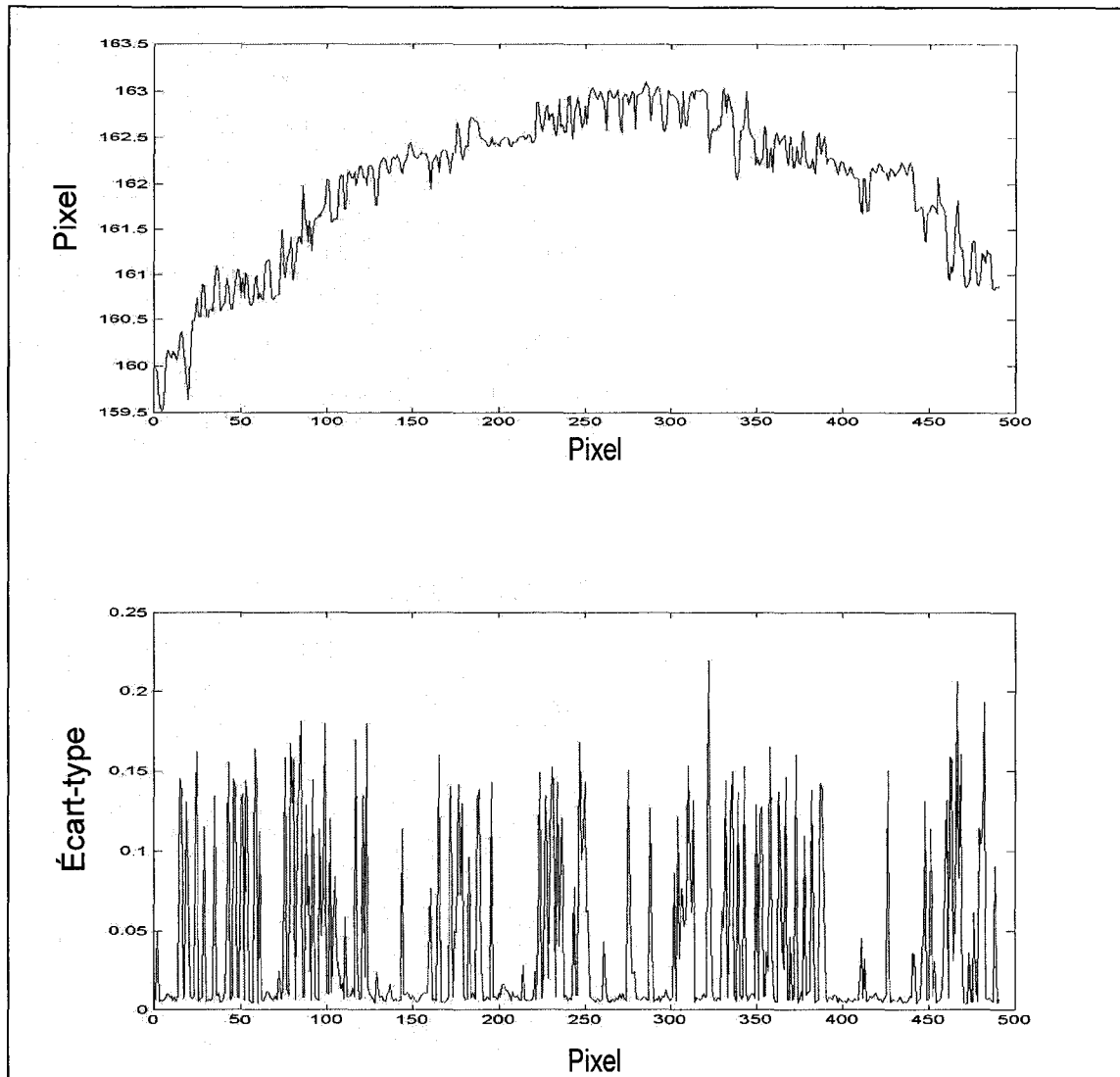


Figure 14 : Statistique colonne par colonne pour le niveau Z_o

Ainsi, la modélisation proposée repose sur des données stables puisque la représentation des profils de Z_o et Z_h varient peu. La Figure 15 présente l'interpolation des hauteurs à partir des lignes de référence. Le montage est le même que pour l'analyse théorique.

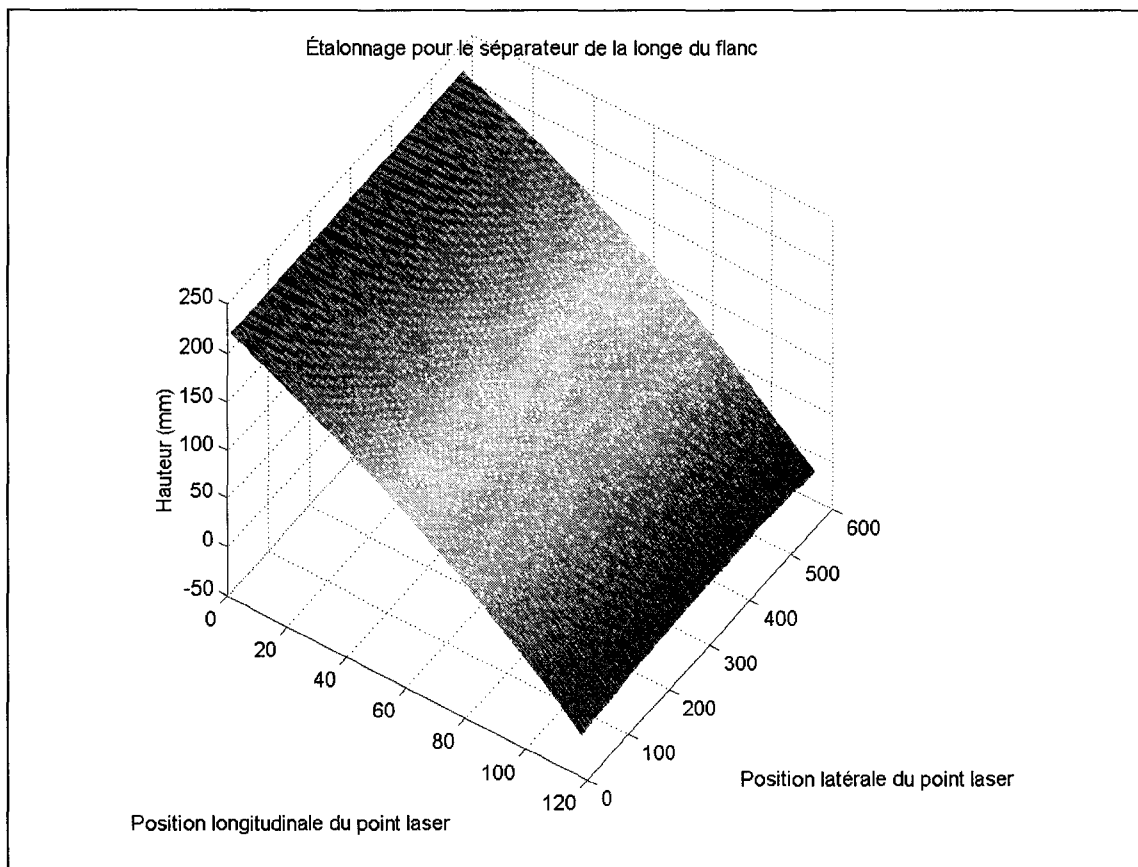


Figure 15 : Étalonnage à partir de l'approche proposée

La comparaison des deux plans d'étalonnage est illustrée sur la Figure 16. La variation est comprise entre $-6,12$ mm et $11,27$ mm. La différence moyenne est de $6,10$ mm et son écart type de $2,33$ mm. Ces valeurs permettent de conclure à la validité de cette approche avec comme avantage sa prise en compte des imperfections mécanique, optique et électronique. Comme le montre la Figure 16, notre méthode prend en compte une rotation du plan réel d'étalonnage. Les paramètres intrinsèques et extrinsèques à fournir sont minimaux. L'approximation des hauteurs faite par cette méthode d'étalonnage donne une bonne précision et une répétitivité comme le montre la démarche employée dans la section 2.3.4.

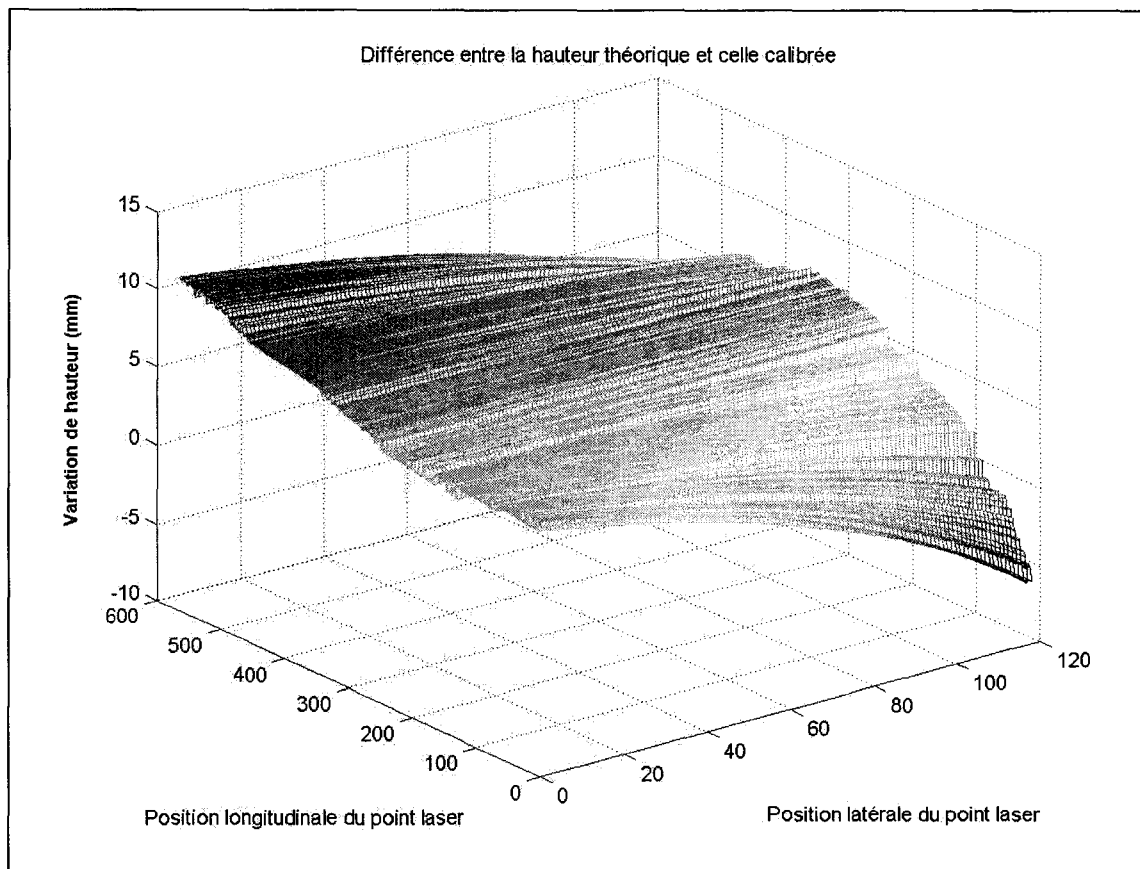


Figure 16 : Différence entre les deux plans d'étalonnage

2.3.3 Correction spatiale

L'algorithme de traitement d'images localise la position x' de la ligne laser sur le capteur matriciel. La relation géométrique entre la valeur x' fournie par le système d'acquisition et sa position projetée x dans le monde réel est décrite dans la Figure 12. Par contre, cette valeur apparente x' ne correspond pas à la vraie position X de l'objet qui a une hauteur Z . Il est donc nécessaire de faire une correction spatiale, c'est à dire de trouver la position X pour une hauteur Z et une position apparente x données.

La correction spatiale doit se faire selon les axes longitudinal et latéral à cause du montage optique employé. En effet, si le faisceau laser est perpendiculaire au convoyeur alors seul le recalage latéral est nécessaire. La correction latérale est donnée par l'équation suivante calculée dans l'annexe 2 :

$$X = x - \frac{Z}{Z_c}(x - x_c) \quad (2-8)$$

À la correction longitudinale s'ajoute aussi l'accumulation des images. La direction de déplacement de l'objet ainsi que le sens de l'acquisition au niveau du capteur matriciel régissent l'ordonnancement des profils laser dans les images de sortie (intensité et topologie). Si leurs directions sont identiques, la correction δx doit être ajoutée sinon elle est soustraite. Elle est donnée selon la Figure 17 par la translation :

$$\delta x = X - X_c = X - x_c \quad (2-9)$$

L'expression de la correction en fonction de la valeur apparente et de la hauteur est donnée par :

$$\delta x = (x - x_c) \left(1 - \frac{Z}{Z_c} \right) \quad (2-10)$$

Comme le montre la Figure 17, pour chaque image i une correction δx est calculée. L'accumulation se fait toujours autour du centre optique et l'indice dans l'image de destination est donnée par :

$$i_{destination} = arrondir(i_{boucle} + \delta x_{iboucle}) \quad (2-11)$$

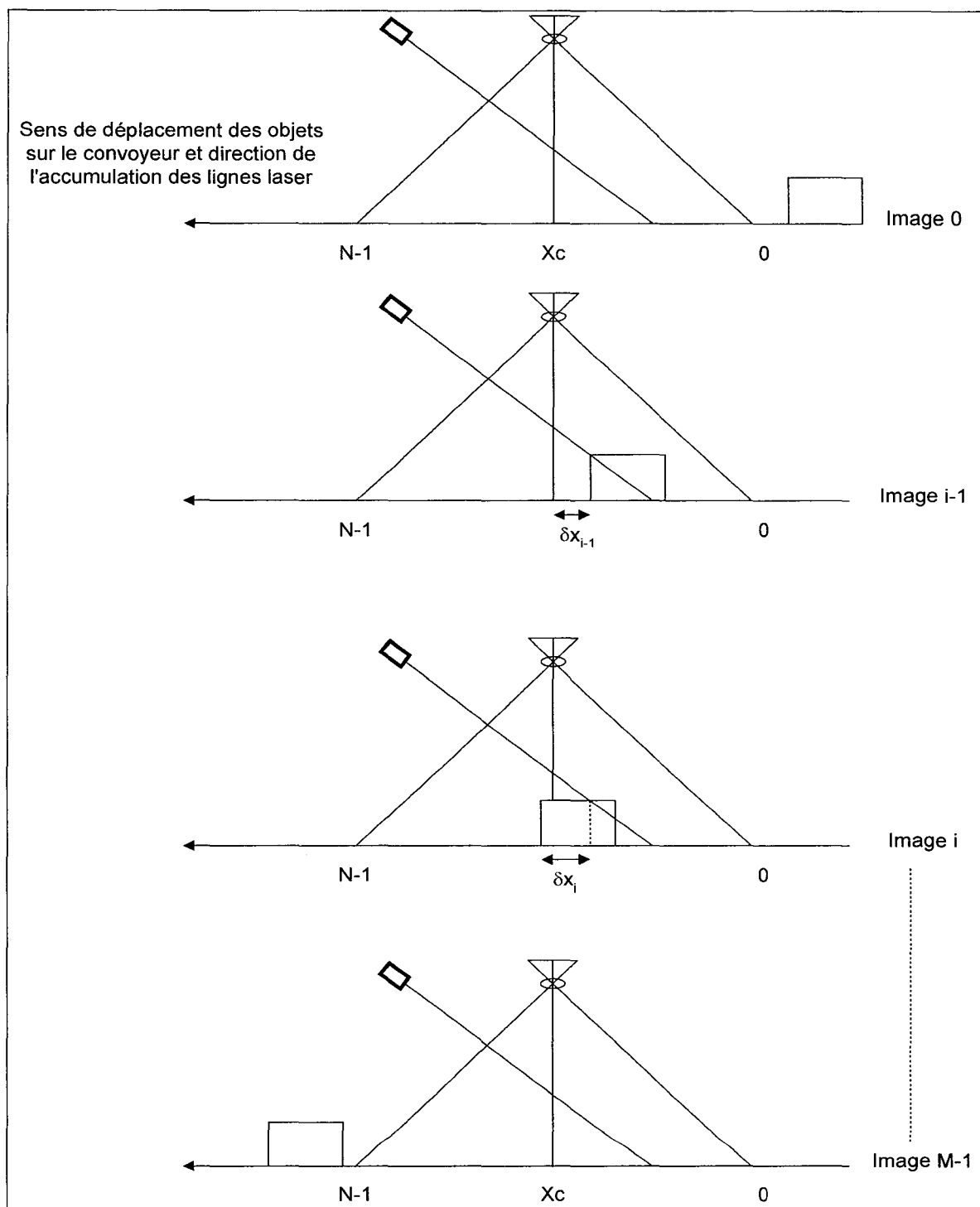


Figure 17 : Correction spatiale

En cas de superposition des points lors de la création des images de destination, la hauteur et l'intensité maximales sont prises en compte. Par contre, certains pixels des images de topologie et d'intensité ne contiendront aucune information à cause de l'ombrage mais aussi parce que les positions (x, y) après la correction nécessitent d'être arrondies.

2.3.4 Erreur

L'évaluation de l'erreur permet de connaître la pertinence de l'utilisation du système d'acquisition dans le cadre d'applications industrielles. La précision de cette méthode d'acquisition pour cette approche d'étalonnage est abordée dans cette section. L'expression de la hauteur est donnée par la relation suivante :

$$z = g(x, x_o, x_h, Z_o, Z_h) \quad (2-12)$$

L'expression de l'erreur est donnée par la relation suivante :

$$\Delta z = \frac{\partial g}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial x_o} \Delta x_o + \frac{\partial g}{\partial x_h} \Delta x_h \quad (2-13)$$

avec

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\alpha(x + \lambda) - (\alpha x + \beta)}{(x + \lambda)^2} = \frac{\alpha\lambda - \beta}{(x + \lambda)^2} = \frac{Z_h Z_c [x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]^2} \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_o} = \frac{(Z_o - Z_c)(Z_h - Z_o)(Z_h - Z_c)(x - x_h) - x Z_o Z_c (Z_o - Z_c)}{[x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]^2} \quad (2-15)$$

et

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_c - Z_h)(Z_h - Z_o)(Z_o - Z_c)(x - x_o) - xZ_oZ_c(Z_c - Z_h)}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2} \quad (2-16)$$

L'erreur est directement proportionnelle à la distance de travail et inversement proportionnelle à la distance focale et à la distance entre l'origine du laser et le capteur matriciel.

Pour valider la qualité de cette méthode d'étalonnage, un bloc de test aux dimensions connues est utilisé pour pouvoir juger de la précision et de la répétitivité. Le bloc de test a été usiné sur une machine à commande numérique et a été mesuré avec un vernier électronique de marque Mitutoyo (Modèle Serie 500-193) qui a une résolution de 0,0005 pouces (12,7 μm) et une précision de $\pm 0,001$ pouces (25,4 μm). Le bloc a été numérisé et son image est présentée à la Figure 18.

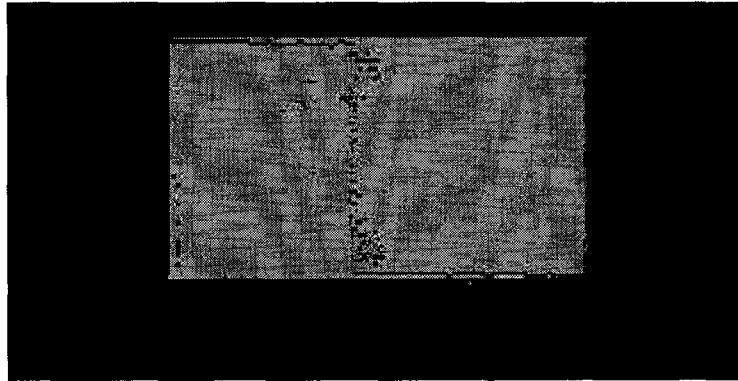


Figure 18 : Bloc de test

Le tableau suivant représente les valeurs utilisées pour ce montage :

f	Zc	Zo	Zh	px	py	dy
6 mm	716,5 mm	7 mm	219,5 mm	0,9838 mm	0,9838 mm	3,44 mm

Tableau 3 : Valeurs utilisées lors de l'étalonnage

Après une segmentation, une image binaire est produite pour servir de masque sur l'image de topologie. L'analyse statistique du bloc donne les résultats suivants

	Hauteur (mm)		Largeur (mm)		Longueur (mm)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Mitutoyo	67		164		69	
Vison 3D	66,95	0.5997	163,18	0,5205	72,4592	0,5064

Tableau 4 : Valeurs mesurées par le vernier et la vision 3D

La hauteur et la largeur donnent de très bons résultats car leurs erreurs respectives sont inférieures à 1%. La longueur a une erreur de 5% car l'échantillonnage dans le sens longitudinale est beaucoup plus important (3,44 mm).

En conclusion, cette méthode malgré sa simplicité donne de bons résultats pour le type d'application envisagé. Le chapitre suivant le confirme à travers l'étude des résultats d'une application industrielle.

2.3.5 Occlusion

La résolution du système d'acquisition, c'est à dire la hauteur réelle d'un « *pixel* » du capteur matriciel dépend notamment de la distance entre le centre optique et la position du laser. Plus cette distance est grande, plus la résolution est importante. Cependant, le

phénomène d'occlusion augmente également, ce qui conduit à une perte d'information spatiale.

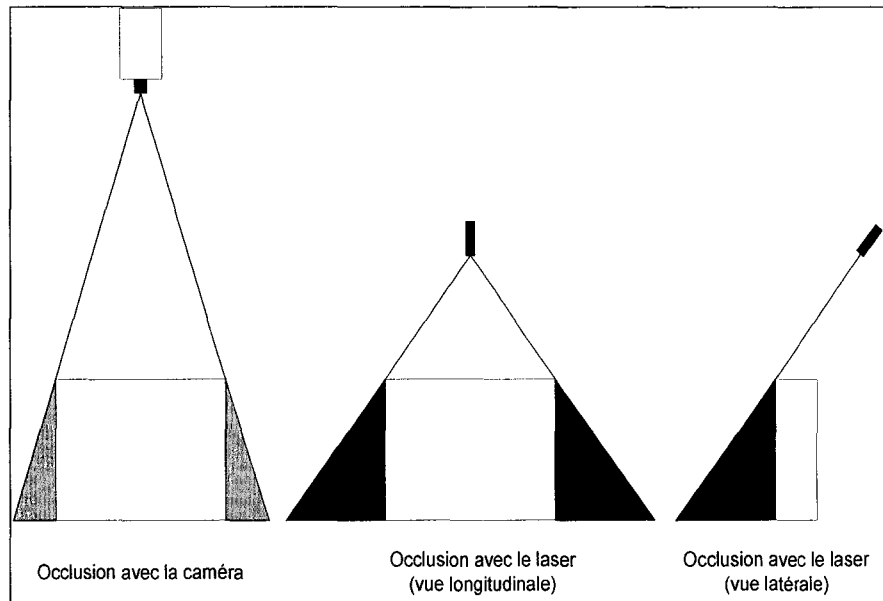


Figure 19 : Différents types d'occlusion

Évidemment, l'occlusion est dépendante de la nature de l'objet présent dans la scène. La triangulation au laser comporte deux types d'occlusion :

- a. Créée par la caméra , c'est à dire qu'elle ne voit pas la surface éclairée par le laser ;
- b. Créée par le laser, c'est à dire que sa lumière n'atteint pas la surface pourtant visible de la caméra.

L'occlusion est limitée par un choix judicieux de la distance de base, des ouvertures de l'objectif de la caméra et du laser ainsi que des hauteurs des centres optiques. Il s'agit donc d'évaluer le meilleur compromis entre les ombrages et les besoins de l'application (champ de vue et résolution verticale).

Des techniques moins empiriques consistent à ajouter des lasers ou des caméras supplémentaires [RIO86] mais ces méthodes ne font pas l'objet de ce mémoire.

2.4 Extraction de la ligne laser dans l'image acquise

2.4.1 Localisation du laser sur le CCD

Pour chaque image contenant un profil laser, l'extraction de cette ligne s'effectue colonne par colonne ou ligne par ligne selon l'orientation du laser par rapport au sens de balayage du CCD. Si une extraction colonne par colonne est considérée à titre d'exemple, la Figure 20 montre l'algorithme utilisé. Pour chaque colonne, le profil d'intensité est récupéré dans un tableau de valeurs flottantes dans lequel l'intensité maximale est détectée. Ce dernier n'est valide que s'il est supérieur à une valeur de seuil T . En prenant un pourcentage de l'intensité maximale, l'algorithme génère une limite à droite et une autre à gauche du pic d'intensité. Ces deux bornes définissent la zone à intégrer. A l'intérieur de ces deux limites, le calcul du centre de gravité ainsi que celui de l'intensité moyenne sont faits.

$$somme = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} x \quad (2-17)$$

$$somme_x = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} p_x \times x \quad (2-18)$$

$$somme_p = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} p_x \quad (2-19)$$

d'où

$$x_{cg} = \frac{somme_x}{somme} \quad (2-20)$$

$$i_{\text{moyen}} = \frac{\text{somme}_p}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}} + 1} \quad (2-21)$$

Les équations précédentes donnent les expressions des valeurs présentées à la Figure 20.

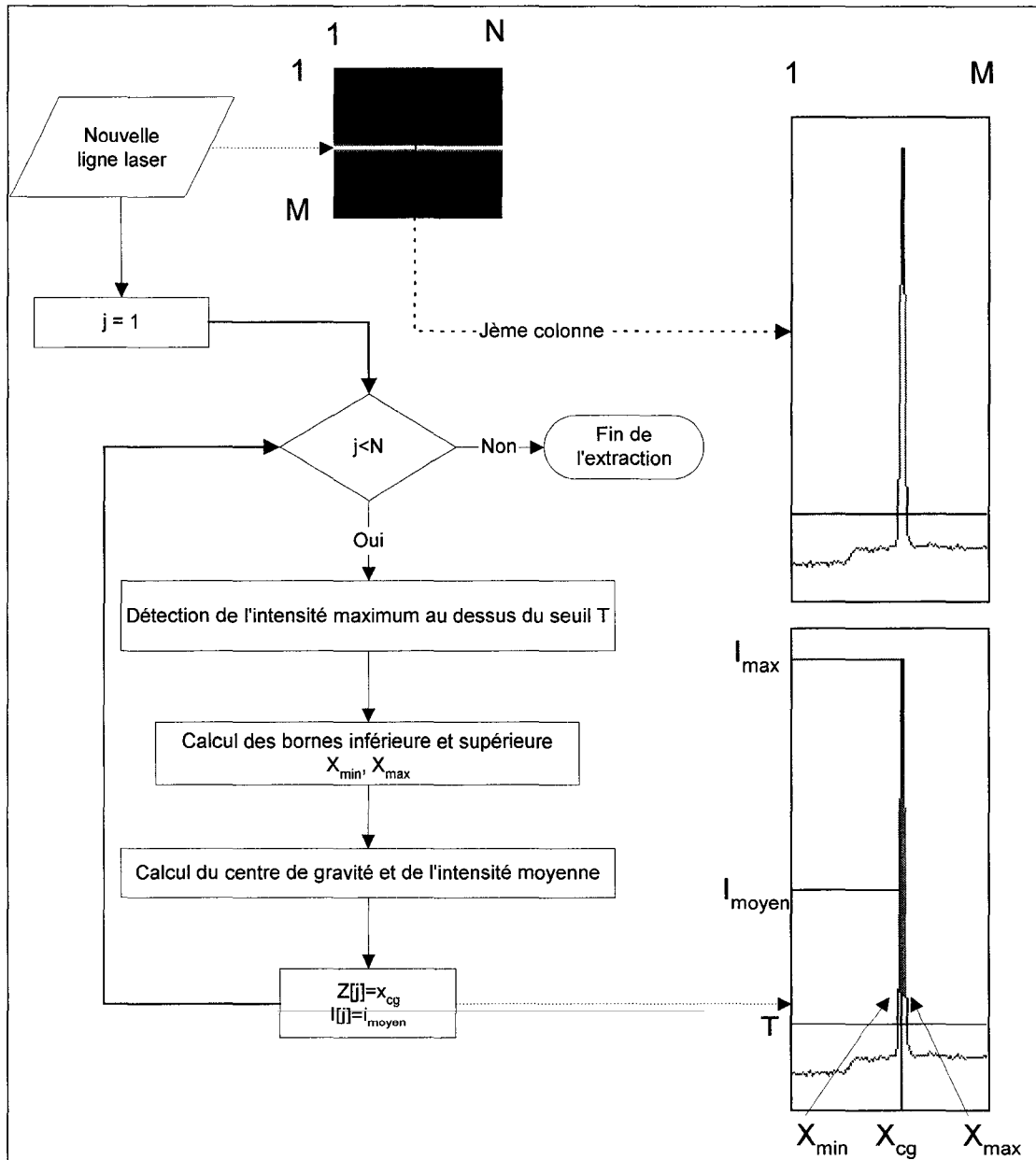


Figure 20 : principe de l'extraction du centre de gravité et de son intensité associée

Les capteurs matriciels que sont les CCD sont des capteurs discrets c'est à dire qu'ils sont composés de pixels. Une procédure de sous-pixelation⁸ est nécessaire pour estimer la valeur d'une mesure dans une image à une précision plus grande que celle fournie et restreinte par la discrétisation. Comme le montre les équations précédentes, l'algorithme de sous-pixelation est une méthode basée sur les moments. Cette dernière calcule le centre de gravité. Cette façon de faire offre les avantages suivants :

- a. Algorithme robuste au bruit car basé sur l'intégration et non sur la différenciation comme la plupart des détecteurs de transition ;
- b. Algorithme robuste à un faible aliasage⁹. Il est théoriquement exact si la fréquence d'échantillonnage est plus grande que celle de Nyquist¹⁰ [ALE91] ;
- c. Nécessite peu de calcul ;
- d. Facile à implémenter.

Par contre, la suppression du bruit au moyen du seuillage est importante sinon l'estimation du centre de gravité serait biaisée.

2.4.2 Techniques de filtrage

Cette section concerne les aspects suivants :

- a. Filtrage optique : c'est à dire le choix adéquat des filtres à placer devant l'objectif de la caméra pour supprimer l'éclairage ambiant et pour obtenir ainsi une image quasi binaire ;

⁸ Action d'aller au-delà de la résolution du capteur.

⁹ Effet de marches d'escalier dû à la discrétisation de l'image.

¹⁰ Fréquence de Nyquist vaut deux fois la fréquence maximale du signal à échantillonner.

- b. Filtrage des pixels ne contenant jamais d'information dû à la résolution verticale spécifique à l'application ;
- c. Filtrage logiciel dans le cas de plusieurs points laser pour une même ligne ou colonne du capteur matriciel.

2.4.2.1 Filtrage optique

L'éclairage ambiant doit être neutralisé. Pour ce faire, la scène à numériser comme la tête optique sont placées dans une boîte. Tout éclairage direct est ainsi supprimé. L'interaction de la lumière ambiante avec notre champ de vue est donc réduite aux ouvertures. La Figure 21 représente une acquisition sans filtre.

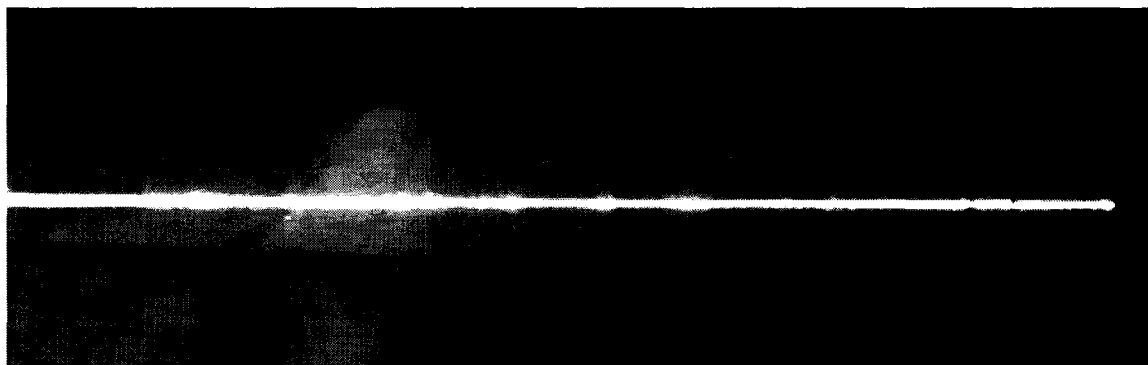


Figure 21 : Image sans filtre

Pour être indépendant de l'environnement, à savoir de l'organisation de la salle de découpe pour le type d'applications décrites dans ce mémoire, ou de toutes modifications postérieures à l'installation, cela nécessite l'addition d'un filtre devant l'objectif en vue d'obtenir cette image quasi binaire. Généralement, la technique utilisée est l'emploi d'un filtre interférentiel centré sur la longueur d'onde du laser et ayant une largeur de bande très étroite. La Figure 22 montre le résultat avec ce type de filtre.

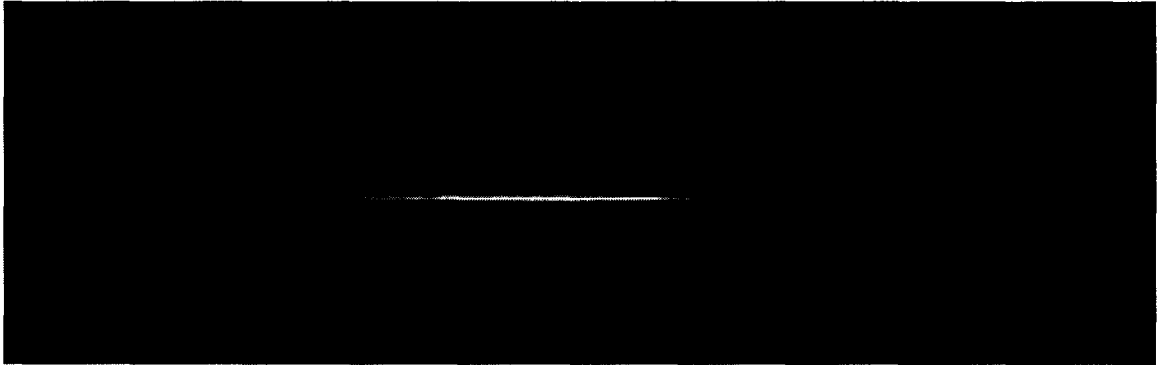


Figure 22 : Image avec filtre interférentiel

Les extrémités de la ligne laser sont manquantes. Sur la Figure 21, la limite gauche de la ligne du laser a pourtant été épaissie volontairement avec la lentille cylindrique placée en avant du laser pour montrer que le problème avec ce type de filtre n'est pas relié à l'intensité. Les faisceaux de lumière laser entrant dans le filtre doivent être parallèles à l'axe optique. En effet, les rayons lumineux qui pénètrent avec un angle α , ont leur longueur d'onde qui est changée par un facteur $1/\cos \alpha$. Pour résoudre ce problème, quatre solutions sont envisageables :

- a. Concevoir un filtre interférentiel qui tient compte de la longueur d'onde du laser et de sa déviation maximale qui est fonction de l'ouverture de la lentille. Le coût d'une telle solution est élevé et toute modification d'objectif pourrait amener à une nouvelle conception. De plus, cette solution ne répond pas au critère de départ qui consistait à utiliser des produits commerciaux standards.
- b. Trouver un filtre interférentiel et un laser compatibles pour un objectif donné. Le choix des lasers se portent sur des produits au coût plus élevés car moins courants. De plus, le travail serait remis en question à chaque changement d'objectif.
- c. L'utilisation d'une lentille zoom mais ce type d'objectif ne correspond pas aux types d'applications développées dans le cadre de ce mémoire.

- d. L'utilisation de deux filtres qui sont pour l'un de type passe-haut et l'autre de type passe-bande. Leur utilisation en parallèle permet de reproduire un filtre passe-bande avec une largeur de bande moins sélective qu'un filtre interférentiel. La Figure 23 montre une acquisition avec ce type de filtrage. L'éclairage ambiant est supprimé et la ligne laser est complètement formée.

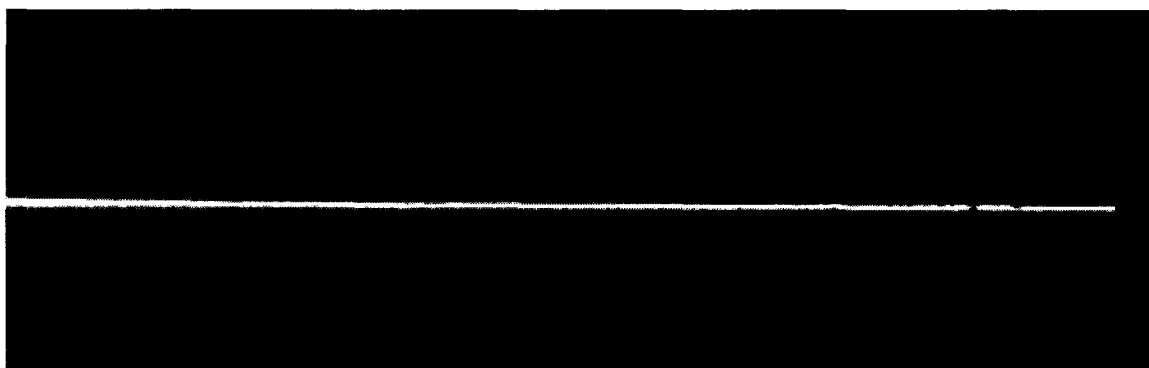


Figure 23 : Filtrage avec un filtre passe-bande et un filtre passe-haut

2.4.2.2 Filtrage des pixels non utilisés

Cette section montre comment utiliser l'acquisition partielle qu'offre certaines caméras comme technique de filtrage. Cette méthode permet de supprimer l'acquisition et le traitement de zones d'images qui ne sont pas utilisées par l'application. Cet exemple est basé sur l'utilisation de la caméra PULNIX TM-6703.

Cette caméra offre trois modes d'acquisition, à savoir le format VGA standard (640 x 484), l'acquisition d'une ligne sur deux (640 x 242) ou l'acquisition partielle¹¹ (640 x 200 ou 640 x 100). Ce dernier mode a été retenu car il permet de choisir la taille de l'image la mieux appropriée pour la résolution verticale nécessaire. La Figure 24 montre

¹¹ Note d'application de Matrox : g_tm6703.pdf qui est téléchargeable du site www.matrox.com

la taille d'image retenue en fonction des hauteurs Z_o (ligne 300) et Z_h (ligne 160) utilisées pour l'étalonnage. L'acquisition 640 x 200 est retenue comme le meilleur compromis entre la résolution verticale voulue et la taille d'image. Il est à noter que l'acquisition partielle sur cette caméra est centrée, ce qui évite une dislocation de l'objet dans le champ de vue. De plus, cette méthode a l'avantage d'augmenter la vitesse d'acquisition en tenant compte de la résolution verticale nécessaire.

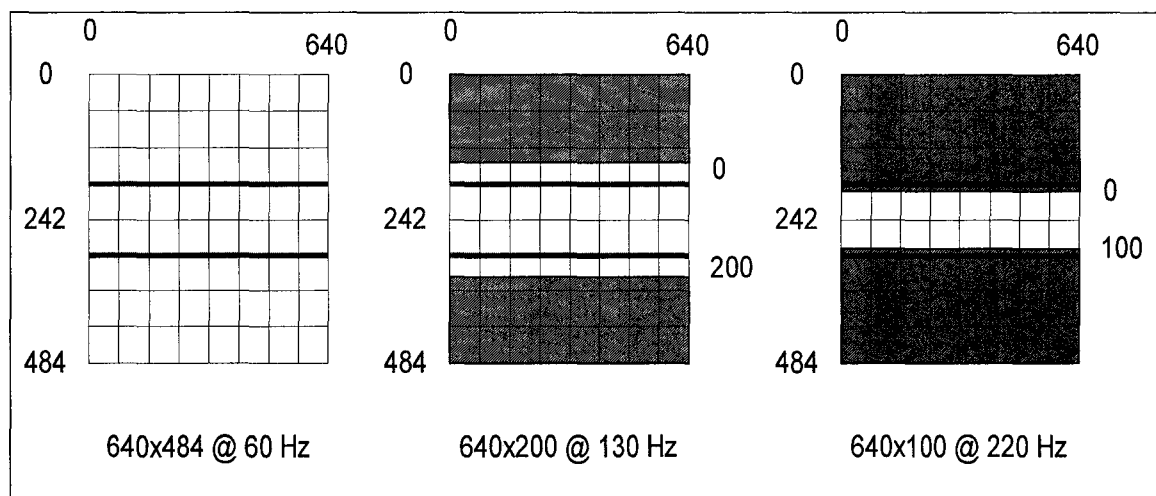


Figure 24 : Acquisition partielle

Le choix de l'architecture de la caméra est important pour éviter certains artefacts dans l'image qu'il faudrait alors prendre en compte de manière logicielle.

Le premier est la persistance¹² dans l'image. Pour résoudre ce problème, la caméra retenue doit posséder un transfert de type interligne. Ce type de caméra matricielle est composé de photodiodes séparées par des registres de transfert verticaux qui sont masqués par une plaque de métal pour éviter le contact avec la lumière entrante. Après

¹² Apparition de lignes verticales du haut en bas de l'image. Ce défaut est dû à l'insolation des cellules (pixels) durant leur transfert.

l'intégration, les charges générées par les photodiodes sont transférées aux registres dans un temps de 1 μ s environ. Cette rapidité de transfert permet d'éviter le phénomène de persistance. Si l'architecture comporte un drain pour éviter l'excès de luminosité dû à une intensité trop élevée alors l'obturateur électronique peut avoir un temps d'ouverture variable.

Le deuxième est la dislocation de l'objet dans l'image quand on utilise une caméra avec entrelacement. Pour ce faire, une caméra avec acquisition progressive est choisie. Cette technique permet de récupérer l'information du capteur ligne par ligne (non-entrelacée) et donc l'image est obtenue complètement au même instant.

2.4.2.3 Filtrage logiciel

Ce type de filtrage prend en considération la possibilité d'avoir plusieurs maxima locaux pour une même ligne de l'image. Plusieurs techniques peuvent être implémentées pour résoudre ce problème :

- a. Rejeter la ligne c'est à dire qu'elle n'est pas prise en compte ;
- b. Prendre le plus grand des maxima ;
- c. Prendre le centre de gravité de ces maxima comme solution ;
- d. Gérer tous les maxima.

La raison pour laquelle plusieurs maxima peuvent apparaître sur une même ligne est due à des réflexions secondaires du laser sur des surfaces spéculaires ou transparentes. L'environnement dans lequel le système d'acquisition opère est contrôlé ; à savoir que l'éclairage ambiant est filtré, et que les parties mécaniques (vitre, parois,...) ont des finitions qui permettent d'éviter ces réflexions secondaires. Par conséquent, l'algorithme

d'extraction du point laser sur chaque ligne utilise la deuxième technique mentionnée précédemment.

2.5 Implantation

L'architecture du système d'acquisition 3D est basée sur un ordinateur industriel avec des produits standards, c'est à dire fournis par des manufacturiers sans aucune modification. L'idée est d'avoir un système industriel reconfigurable ce qui signifie que l'implantation s'adapte à diverses applications. De plus, cette approche permet d'avoir plusieurs solutions techniques interchangeables pour un même module ainsi que de suivre l'évolution technologique de chaque composante. Par exemple, les ordinateurs, les caméras ou les bus de communications vont avoir de plus grande vitesse de fonctionnement. Ainsi, le système développé va bénéficier implicitement de ces améliorations.

La Figure 25 montre le concept global du système proposé. Le capteur 3D (caméra et laser) acquiert l'information et fournit ces données à une carte d'acquisition qui génère ainsi les images des profils du laser. Ce module doit être capable d'interfacer différents types de caméras pour répondre aux besoins de diverses applications. Le choix s'est porté vers la carte GENESIS-LC de Matrox laquelle permet de numériser des images en utilisant des capteurs analogiques ou numériques au moyen de simple fichier de configuration (« caméra logique »). De plus, la majorité des manufacturiers de caméra est supportée. Cette carte possède une composante électronique capable de générer des signaux logiques ou des trains d'impulsions de déclenchement qui sont programmables dynamiquement. Ainsi, le multiplexage de caméras ou la modification du temps d'exposition peuvent être réalisés lors de la production. La mémoire implantée sur la carte d'acquisition permet de contenir les images obtenues.

Le transfert des images de la mémoire de la carte d'acquisition vers celle de l'ordinateur est réalisé par le bus de communication PCI. Comme le montre la Figure 25, un algorithme de double mémoire avec bascule¹³ permet de mettre en parallèle l'extraction des profils.

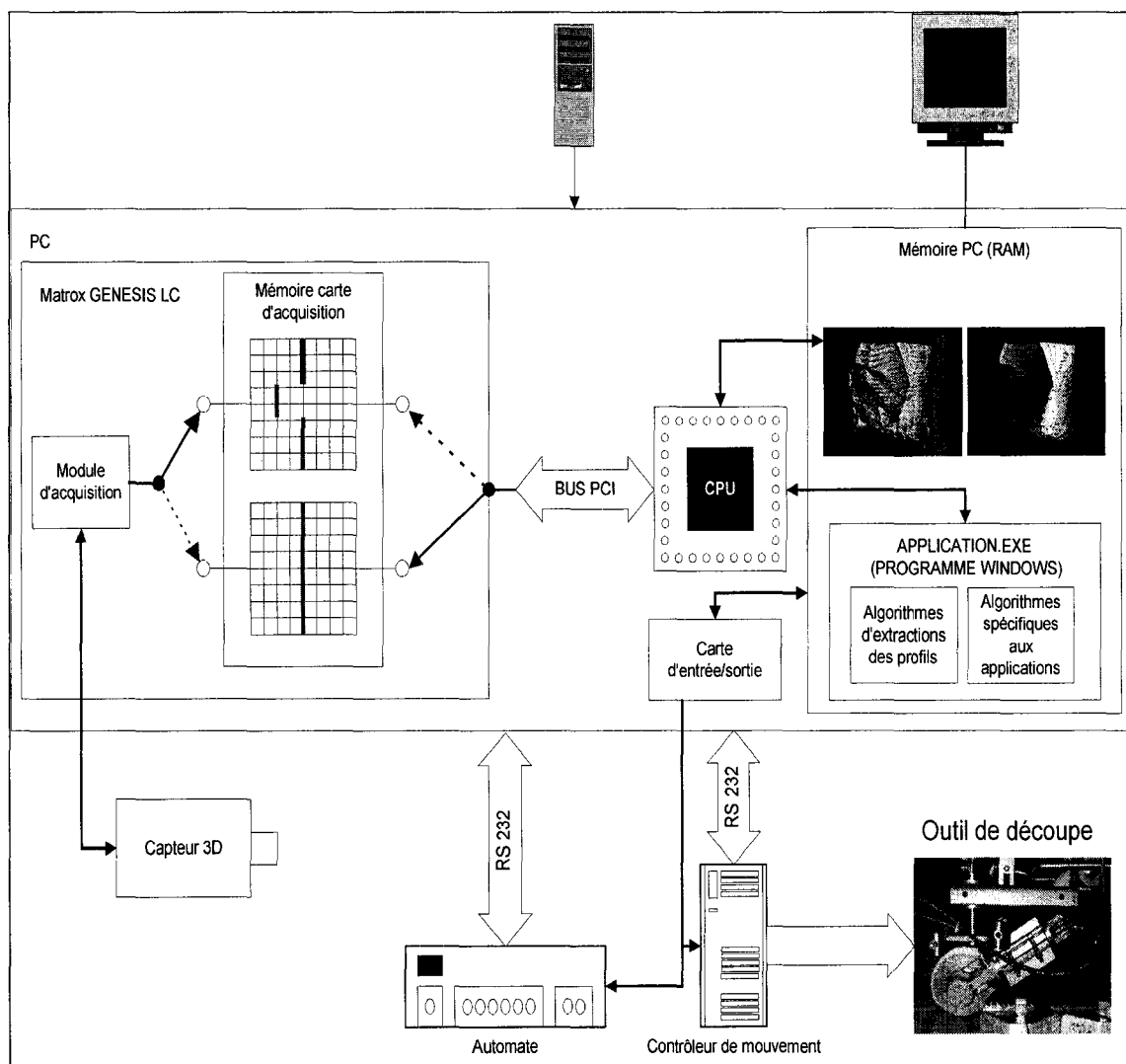


Figure 25 : Architecture générale

¹³ Élément à deux états qui passe d'un état à l'autre au moyen de la même action.

En effet, pendant qu'une image est en train d'être numérisée, la précédente est transférée en mémoire vive de l'ordinateur puis le profil laser est trouvé. Quand l'acquisition de cette image est finie, alors la numérisation suivante se fait dans la mémoire de l'image dont l'algorithme vient d'extraire le profil de la ligne laser tandis que l'algorithme transfère et commence à extraire le profil laser de l'image tout juste numérisée. Le temps d'acquisition de l'information est limité par celui du transfert et de l'extraction de la ligne laser. Copier l'image (640 x 200 pixels) en mémoire PC à partir de celle de la carte d'acquisition prend 2,1 ms en moyenne ce qui donne une fréquence de transfert de 61 MHz (transfert maximal par paquet de 120 MHz). Le temps d'extraction du profil dépend de la position de celui-ci sur le capteur. S'il n'y a aucune information, le parcours de l'image pour détecter des pixels au-dessus du niveau de seuil prend 2,8 ms. Par contre, si le profil est situé à la position 190 sur le capteur matriciel et couvre complètement celui-ci, le temps d'extraction passe à 5,4 ms. Le temps total maximum pour le transfert de l'image et de l'extraction de la ligne laser est de 7,5 ms. La caméra TM-6703 de Pulnix acquiert 130 images par seconde lorsqu'elle est configurée dans le format 640 x 200. Le temps d'acquisition est donc de 7,69 ms. La méthode de transfert est donc valide dans cette configuration d'image. La capacité d'acquisition du système est de 83,2 kHz, soit 130 lignes laser de 640 pixels à la seconde. Dans une autre configuration, elle peut atteindre 140,8 kHz, soit 220 lignes laser de 640 pixels à la seconde. L'utilisation du nouveau modèle TM-6710 de PULNIX permet d'obtenir de nouvelles cadences d'acquisition sans aucune modification de notre montage.

TM-6710			
Format	648x484x8-bit@ 120 Hz	648x198x8-bit@ 240 Hz	648x98x8-bit@ 350 Hz
Capacité d'acquisition	77,76 kHz	155,52 kHz	226,8 kHz

Tableau 5 :Capacité d'acquisition avec la caméra TM-6710

La flexibilité du système permet de communiquer avec les autres composantes de la machine au moyen de différents média (carte d'entrée-sortie, bus sériel RS 232, ...). Cette capacité à communiquer permet de construire une machine où l'opérateur peut à tout moment changer les paramètres de coupe, envoyer des données au contrôleur de mouvement (DMC1520 de GALIL) ou encore indiquer les états de production (étalonnage, production manuelle ou automatique) à un automate.

Le logiciel (Figure 26) est une application WINDOWS écrit en Visual C++. Il incorpore les bibliothèques fournies par les fabricants pour communiquer avec leur équipement.

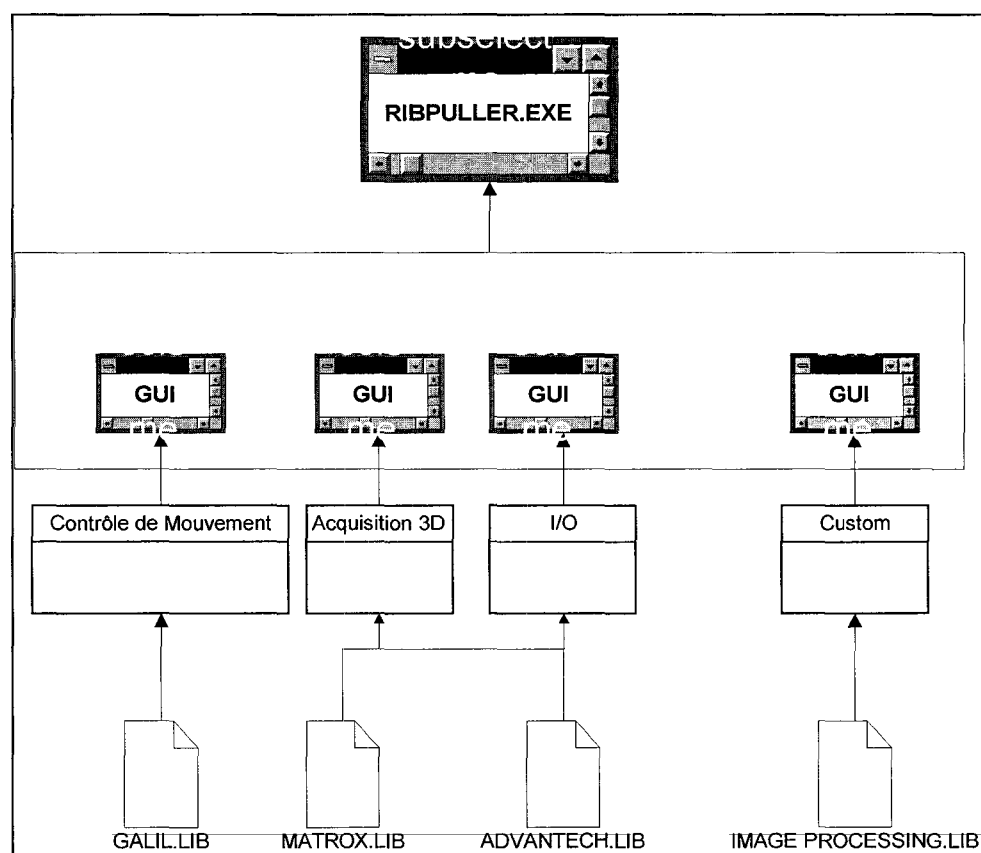


Figure 26 : Architecture du Logiciel

Chaque module possède généralement sa propre interface graphique. L'ensemble de ces objets permet de dériver un objet spécifique à une application. Celui-ci possède alors sa propre interface graphique reposant sur celles de plus bas niveaux ainsi qu'une bibliothèque communiquant avec les modules de base pour construire les algorithmes de l'application.

La Figure 27 est un exemple d'interface utilisateur. Les résultats spécifiques à une application y sont montrés ainsi que la fenêtre des états des entrées et des sorties qui est commune à chaque application.

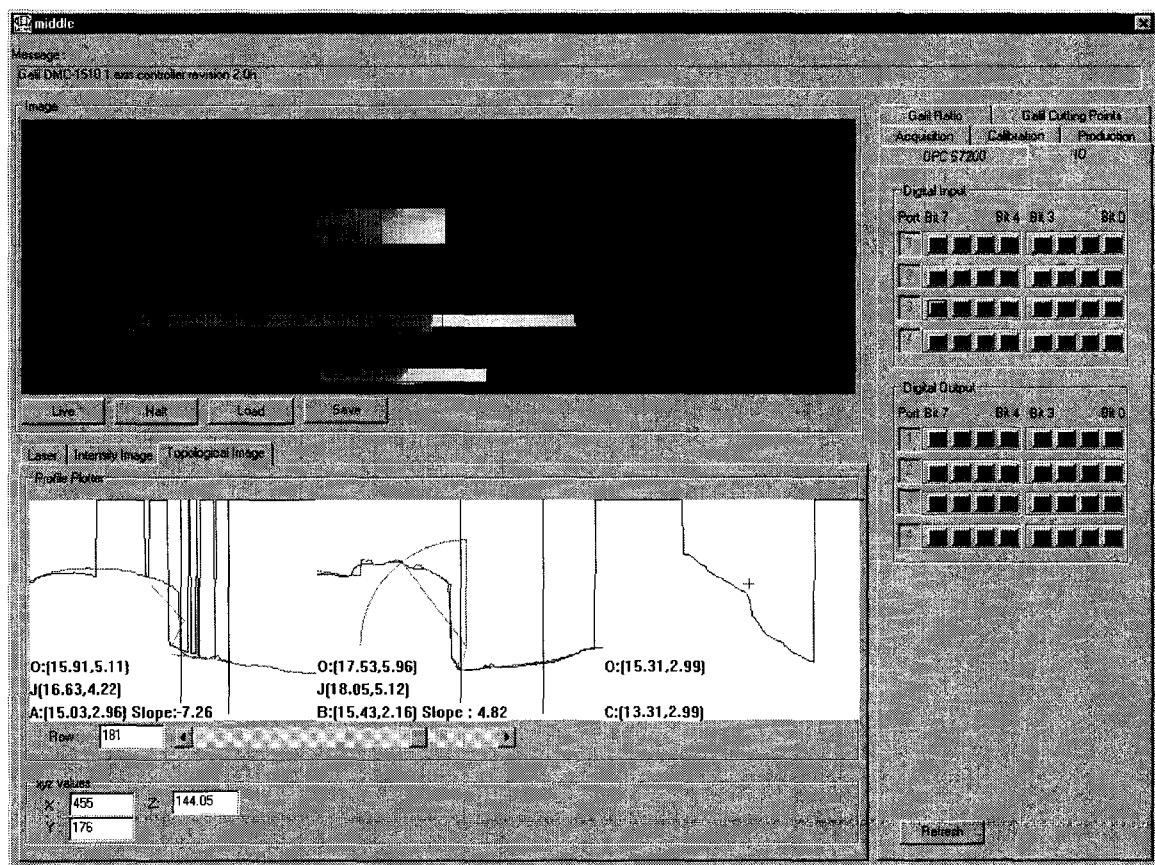


Figure 27 : Interface usager (GE Leblanc)

CHAPITRE 3

EXPÉRIMENTATION ET VALIDATION

3.1 Introduction

Le système de triangulation a été présenté dans la première partie de ce travail. L'approche théorique ainsi que les outils utilisés pour la réalisation de ce capteur 3D ont été décrits. Il s'agit maintenant d'évaluer la méthode proposée dans ce mémoire à travers trois applications industrielles. La première est la séparation de la longe du flanc qui doit permettre de juger de la qualité de la précision et de la répétabilité d'une machine utilisant ce type de capteur 3D. La deuxième application est la reconnaissance du flanc (droit ou gauche) qui doit confirmer la nécessité de générer une image de topologie et une autre en niveaux de gris. En dernier, la reconstruction de la surface d'un œil de ronde doit montrer la pertinence d'un tel système d'acquisition pour effectuer une tâche complexe.

3.2 Application de la séparation de la longe du flanc

3.2.1 Introduction

L'application décrite dans cette section est une coupe primaire qui consiste à séparer la longe du flanc. La Figure 28 montre la localisation de chacune des parties sur la pièce de viande. La présentation de cette application a pour but de valider la précision et la répétabilité du système proposé. En effet, l'industrie veut avoir l'intégralité des découpes comprises dans un intervalle de $\pm \frac{1}{4}$ de pouces (6,35 mm) autour d'une mesure cible. Les résultats présentés ci-dessous prennent en compte la totalité des erreurs du système à

savoir celles de la mécanique, de l'électronique, de l'étalonnage ainsi que de diverses sources de bruit.

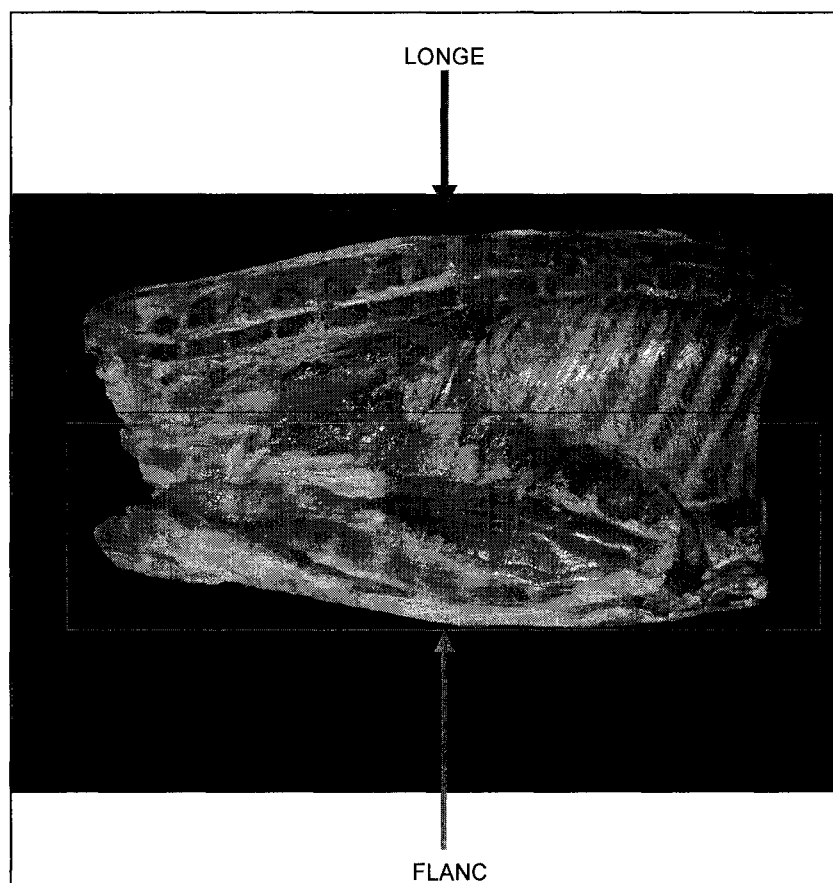


Figure 28 : Description pour la séparation de la longe du flanc

3.2.2 Description du système

Ce système automatique permet la séparation de la longe selon le procédé canadien. La spécification de coupe (Figure 29) comprend trois distances : une pour l'épaule (section C), une pour la poitrine (section B) et une autre pour le filet mignon (section A). En utilisant ces trois positions sur la pièce de viande, l'algorithme génère une trajectoire de coupe qui passe obligatoirement par les trois repères fournis par la spécification. Des

points intermédiaires sont générés par interpolation pour assurer une meilleure trajectoire de coupe. Dans le cas d'une faible cadence de production, une seule ligne de production transportant les centres droit et gauche est disponible. Le système doit donc discriminer le type de centre pour pouvoir effectuer les mesures appropriées. Le montage optique retenu est celui qui a été développé dans ce mémoire.

Les composantes optiques suivantes ont été utilisées :

- a. Lentille COSMICAR 6 mm ;
- b. Caméra Pulnix TM6703 ;
- c. Filtre passe-haut Melles Griot ;
- d. Filtre passe-bande Melles Griot.

La précision du système d'acquisition a été déterminée précédemment dans ce mémoire. De plus, à cette erreur s'ajoutent les tolérances dues à la mécanique et au système de positionnement. Il faut prendre aussi en considération les incertitudes dans la prise de décision des algorithmes de vision ainsi que dans la prise de mesures par l'opérateur humain. L'analyse statistique des mesures qui ont été prises, prend donc en considération toutes ces erreurs.

Les mesures ont été effectuées sur un échantillonnage de centres avec un vernier électronique de la compagnie Mitutoyo. Les spécifications de l'instrument de mesure sont les suivantes : la résolution est de $\pm 0,001$ pouces (25,4 μm) et la précision est de 0,0005 pouces (12,7 μm).

Les valeurs cibles pour le site où le prototype est installé sont de 2,00 pouces (5,08 cm) à l'épaule, de 3,75 pouces (9,525 cm) à la poitrine et de 1 pouce (2,54 cm) pour le filet mignon (Figure 29). Pour ces spécifications, la trajectoire de coupe est représentée par une ligne pointillée dans la Figure 29.

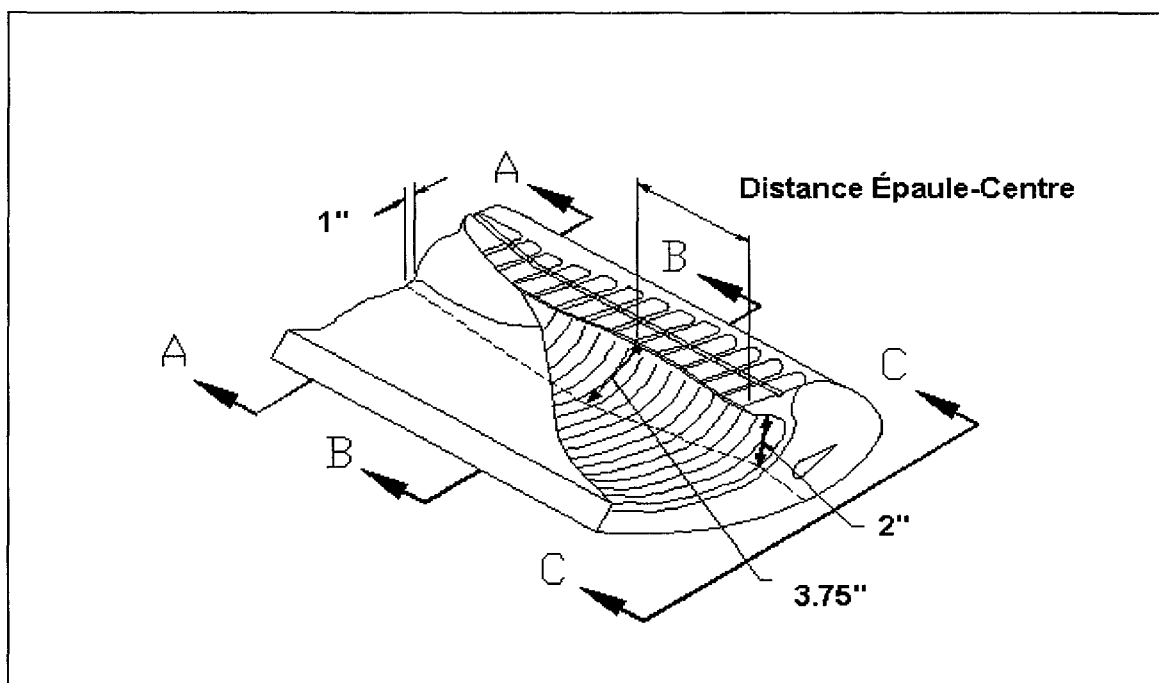


Figure 29: Schéma de principe de la coupe

3.2.3 Résultats

Pour les deux tests, le nombre de mesures est respectivement 437 et 491. Les écarts-types et les moyennes sur les données brutes sont les suivantes :

Test 1	Épaule	Poitrine	Filet Mignon
Moyenne (pouces)	2,034	3,813	1,143
Écart-type (pouces)	0,169	0,165	0,164

Tableau 6 : Statistiques du test 1

Test 2	Épaule	Poitrine	Filet Mignon
Moyenne (pouces)	2,058	3,782	1,0155
Écart type (pouces)	0,161	0,153	0,147

Tableau 7 : Statistiques du test 2

La Figure 30, la Figure 31 et la Figure 32 montrent les histogrammes obtenus pour le premier test. Les distributions ont une allure gaussienne. Les erreurs sont normalement distribuées. En effet, il n'existe pas de point éloigné.

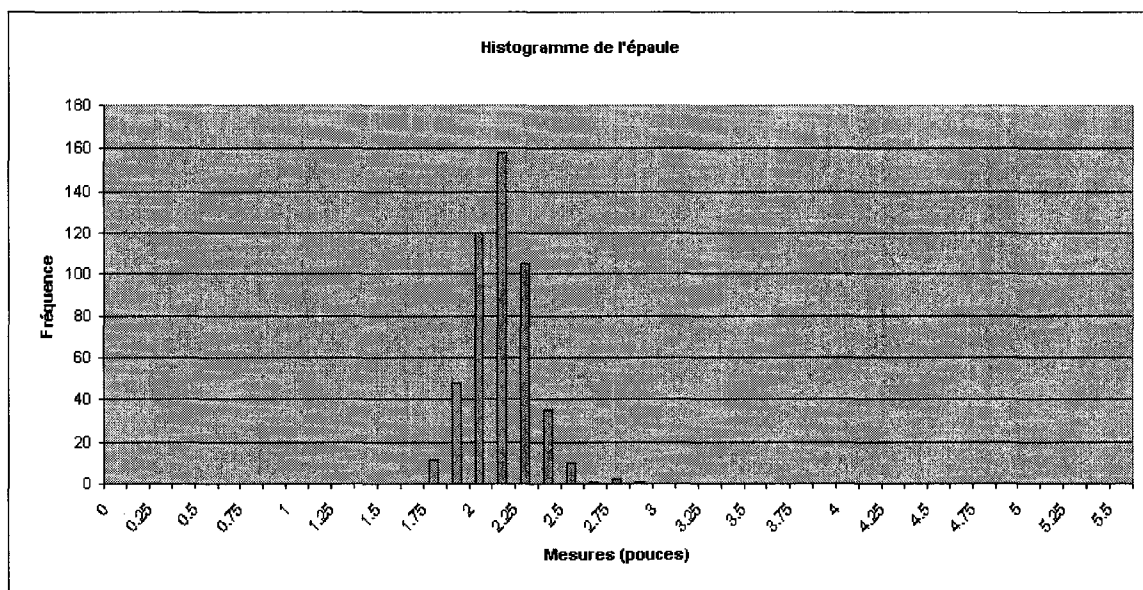


Figure 30 : Histogramme des mesures effectuées à l'épaule

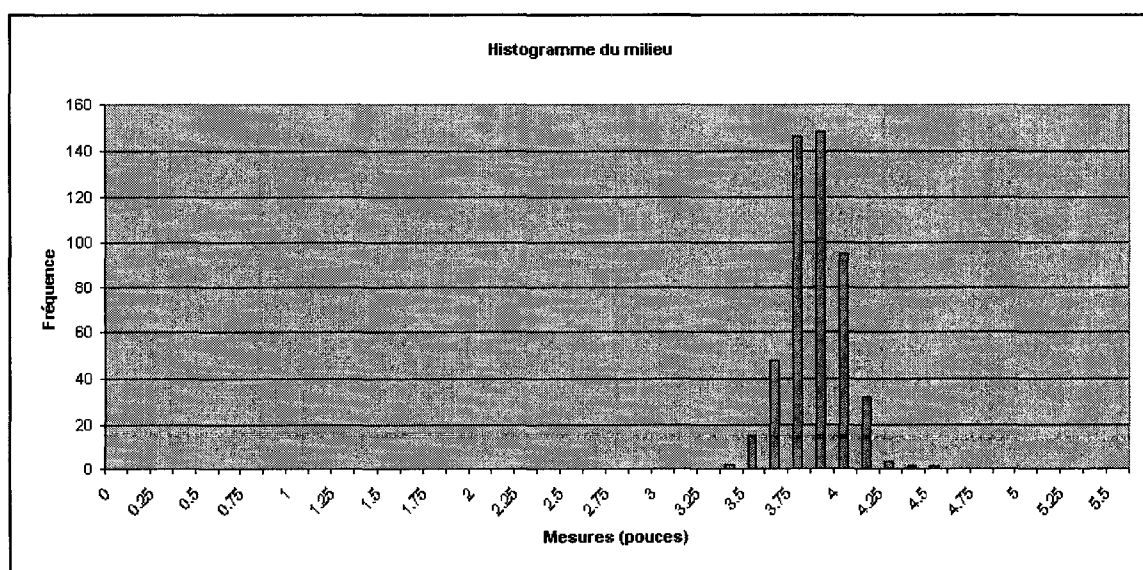


Figure 31 : Histogramme des mesures effectuées au centre

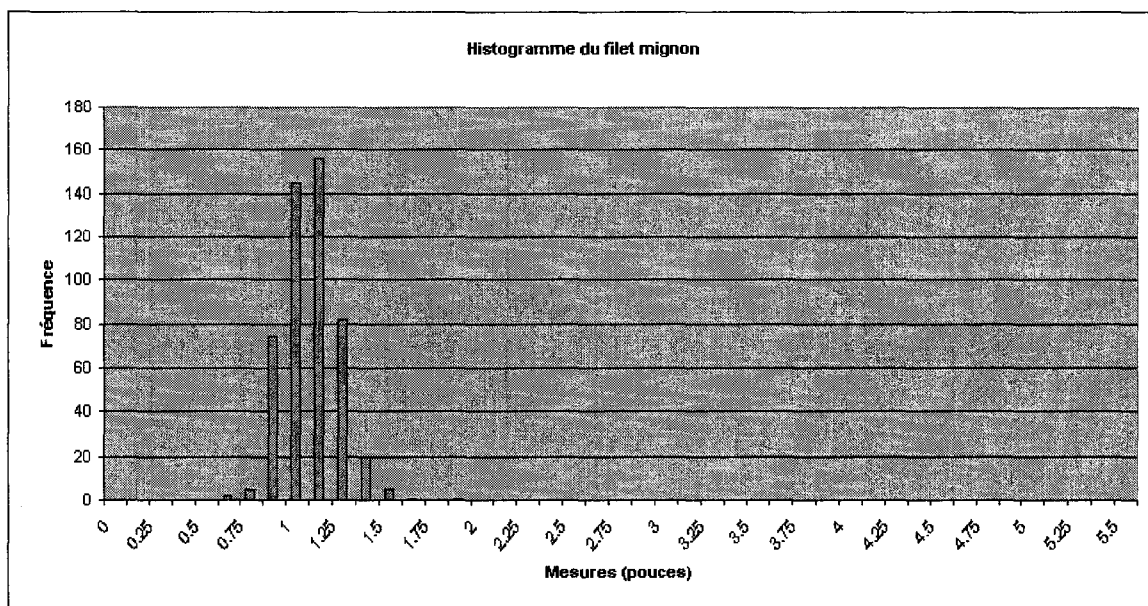


Figure 32 : Histogramme des mesures effectuées au filet mignon

Le Tableau 8 et le Tableau 9 donnent les résultats pour ces deux tests. La première ligne indique le pourcentage de valeurs comprises dans un intervalle de $\pm \frac{1}{4}$ de pouces (6,35 mm) autour de la valeur de spécification. La seconde ligne concerne un intervalle de $\pm \frac{3}{8}$ de pouces (9,525 mm). La troisième ligne (2 critères) donne le pourcentage de pièces de viande dont les points de coupe sont dans un intervalle de $\pm \frac{1}{4}$ de pouces (6,35 mm) autour de la valeur de spécification pour l'épaule et la poitrine.

Mesures	Épaule	Poitrine	Filet
Intervalle de tolérance ($\pm \frac{1}{4}$ "	86,50%	86,27%	79,41%
Intervalle de tolérance ($\pm \frac{3}{8}$ "	95,65%	95,88%	92,45%
Pourcentage d'acceptation			
2 critères $\pm \frac{1}{4}$ " (épaule-milieu)	76,43%		
3 critères $\pm \frac{1}{4}$ " (épaule-milieu-filet)	61,10%		

Tableau 8 : Résultats du test 1

Mesures	Épaule	Poitrine	Filet
Intervalle de tolérance ($\pm 1/4''$)	87,78%	89,00%	93,08%
Intervalle de tolérance ($\pm 3/8''$)	97,15%	98,57%	98,17%
Pourcentage d'acceptation			
2 critères $\pm 1/4''$ (épaule-milieu)	79,59%		
3 critères $\pm 1/4''$ (épaule-milieu-filet)	74,54%		

Tableau 9 : Résultats du test 2

La quatrième ligne (3 critères) indique le pourcentage de pièces de viande dont les points de coupe se trouvent dans un intervalle de $\pm 1/4$ de pouces (6,35 mm) autour de la valeur de spécification pour l'épaule, la poitrine et le filet mignon. Les distributions pour chaque point de coupe sont de nature gaussienne et leur écart type est faible (Tableau 6, Tableau 7). Visuellement, le contremaître en charge de la production a jugé la coupe très satisfaisante. En effet, les coupes sont presque parfaites pour une tolérance de $\pm 3/8$ de pouces (9,525 mm).

Le critère de Chauvenet [LEH97] est appliqué sur les deux ensembles d'échantillons pour supprimer les points de mesures « illégitimes » provenant d'artéfacts ou de mauvaises manipulations. L'hypothèse que les erreurs sont normalement distribuées est faite.

Le principe de ce critère est de rejeter les points dont la probabilité est inférieure ou égale à $1/2N_s$ avec N_s le nombre d'échantillons. Un intervalle de confiance est alors établi. Ce dernier conduit donc à la création d'une limite minimale et d'une autre maximale.

Le Tableau 10 et le Tableau 11 montrent les nouvelles valeurs statistiques pour la distribution de chaque test. Si la valeur moyenne ne change que très peu, par contre, l'écart type diminue en moyenne de 5% pour une réduction allant de 1,34 % à 12,96%.

Critère de CHAUVENET appliqué sur le test 1			
Probabilité 1/(2Ns)	0,00114416		
Mesures	Épaules	Poitrine	Filet
Limite Minimale (pouces)	1,518	3,309	0,644
Limite Maximale (pouces)	2,550	4,316	1,642
Moyenne (pouces)	2,033	3,812	1,134
Écart type (pouces)	0,167	0,155	0,142

Tableau 10 : Statistiques (Chauvenet) pour le test 1

Critère de CHAUVENET appliqué sur le test 2			
Probabilité 1/(2Ns)	0,00101833		
Mesures	Épaules	Poitrine	Filet
Limite Minimale (pouces)	1,562	3,311	0,561
Limite Maximale (pouces)	2,554	4,252	1,470
Moyenne (pouces)	2,054	3,780	1,012
Écart type (pouces)	0,153	0,147	0,139

Tableau 11 : Statistiques (Chauvenet) pour le test 2

Le pourcentage d'acceptation (Tableau 12 et Tableau 13) pour deux ou trois critères ne change que très peu, c'est à dire en moyenne moins de 1%.

Mesures	Épaule	Poitrine	Filet
Nombre valide sur 437 pour le test 1	436	433	431
Intervalle de tolérance ($\pm \frac{1}{4}$ ")	86,70%	87,07%	80,51%
Intervalle de tolérance ($\pm \frac{3}{8}$ ")	95,87%	96,77%	93,74%
Pourcentage d'acceptation			
2 critères $\pm \frac{1}{4}$ (entrée-milieu)	77,31%	432 valides sur 437	
3 critères $\pm \frac{1}{4}$ (entrée-milieu-filet)	62,53%	427 valides sur 437	

Tableau 12 : Résultats (Chauvenet) pour le test 1

Mesures	Épaule	Poitrine	Filet
Nombre valide sur 491 pour le test 2	488	488	488
Intervalle de tolérance ($\pm 1/4$ ")	88,32%	89,55%	93,65%
Intervalle de tolérance ($\pm 3/8$ ")	97,75%	99,18%	98,77%
Pourcentage d'acceptation			
2 critères $\pm 1/4$ (entrée-milieu)	80,79%	486 valides sur 491	
3 critères $\pm 1/4$ (entrée-milieu-filet)	75,35%	484 valides sur 491	

Tableau 13 : Résultats (Chauvenet) pour le test 2

Le peu de mesures jugées invalides est faible ce qui peut s'expliquer par une bonne méthodologie de comptage, des algorithmes de vision fiables et déterministes ainsi qu'une bonne constance de la matière première lors de ces tests.

3.3 Application du levage du flanc

3.3.1 Introduction

Le système présenté dans cette section est une machine de levage automatisé de côtes de porcs. Le but d'un tel équipement est de séparer les côtes levées du flanc (bacon) selon certains critères de coupe établis par l'industrie. Ce système comprend un module de vision qui permet d'acquérir l'information nécessaire. A partir des images de topologie et d'intensité, des algorithmes extraient des caractéristiques propres à la pièce de viande, et à partir de celles-ci génèrent une trajectoire de découpe transmise au robot.

Originellement les flancs gauche et droit étaient traités sur des convoyeurs séparés. Cependant, certains abattoirs pour des questions de rationalisation, séparent la longe du flanc au moyen d'une seule scie de découpe ce qui conduit à avoir tous les flancs sur un seul convoyeur. Dans le cadre de ce mémoire, le module de détection des côtés gauche et droit est présenté à titre d'exemple de fusion de données. Les informations de hauteur et d'intensité vont être utilisées pour générer un vecteur de caractéristiques destiné à un classificateur.

3.3.2 Description générale

Le système de découpe robotisé comprend les modules suivants :

- a. un module de gestion des flancs (automate programmable) ;
- b. un module de vision (PC avec carte de traitement d'images, scanneur 3D) ;
- c. un module robotisé (robot sanitaire outillé pour la découpe) ;
- d. Un module mécanique de séparation de la côte levée du bacon.

Les photos suivantes (Figure 33 et Figure 34) montrent le système en action avec les flancs qui arrivent sur un seul convoyeur (Mitchell's Gourmet Foods à Saskatoon, Saskatchewan). Cette machine est en opération sur une base journalière depuis le mois d'août 1998

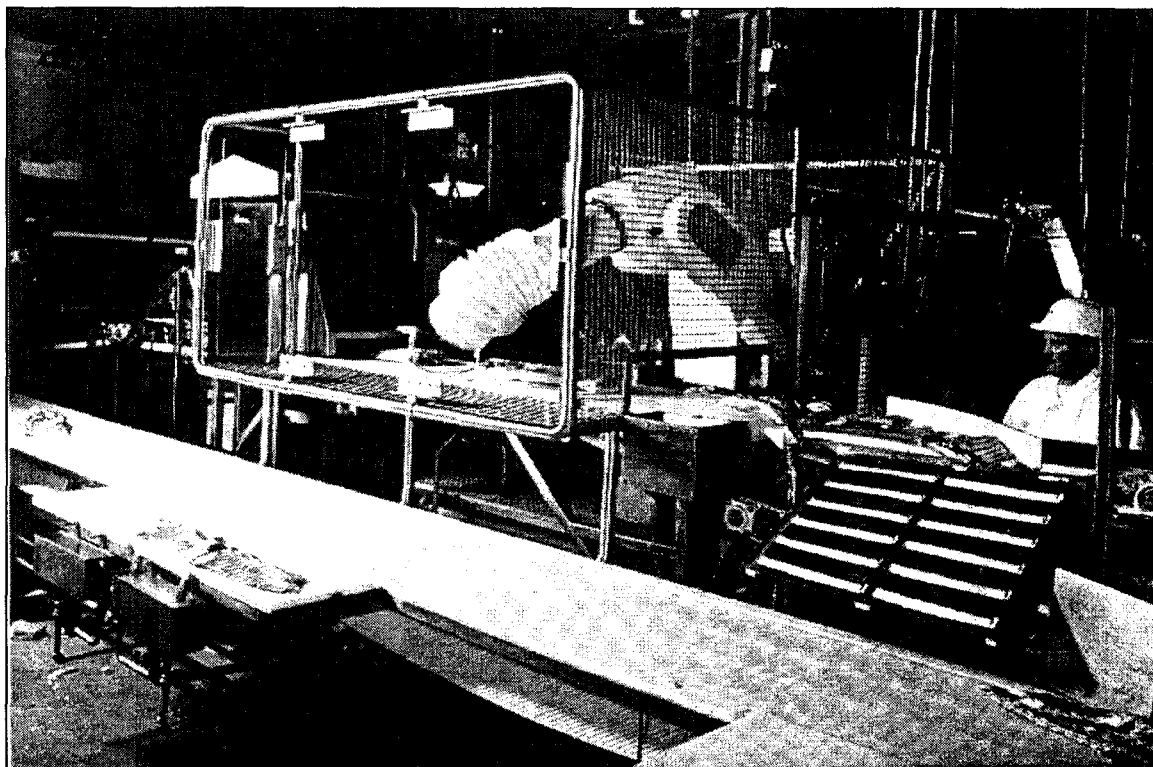


Figure 33 : Installation (CRIQ)

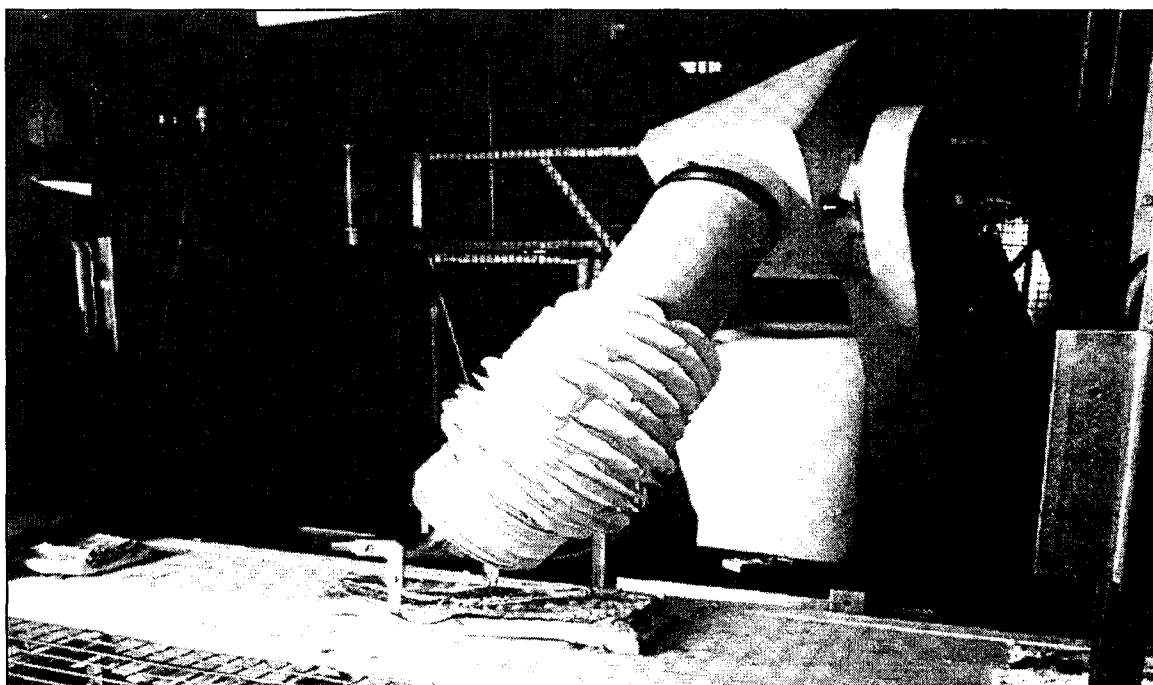


Figure 34 : Robot en action (CRIQ)

Le scanneur 3D présenté dans ce mémoire génère les images (Figure 35 et Figure 36) suivantes qui seront utilisées lors du traitement d'images.

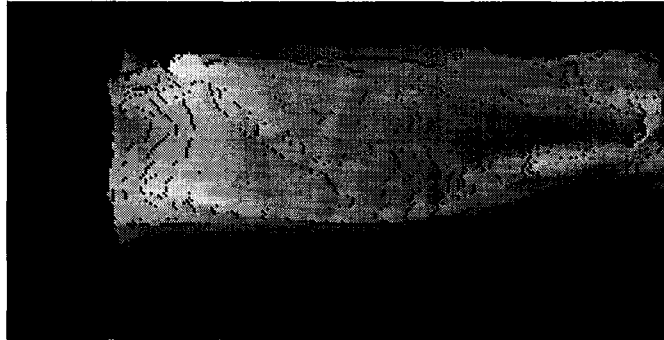


Figure 35 : Image Topologique d'un flanc de porc

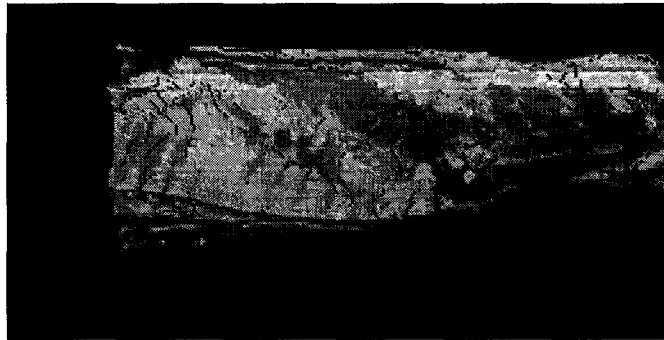


Figure 36 : Image Intensité du flanc de porc

La Figure 39 présente les différents termes employés ainsi que leur localisation. Les photographies suivantes (Figure 37 et Figure 38) montrent respectivement un flanc de porc droit avant traitement et sa côte levée. Cette dernière doit avoir une épaisseur de viande constante pour l'ensemble de la surface de la pièce. De plus, aucun os ne doit apparaître. Pour le bacon, la viande doit être répartie uniformément, c'est à dire qu'il ne

faut pas avoir du gras localisé à un endroit spécifique. De plus, le bacon ne doit contenir aucun cartilage ou os.

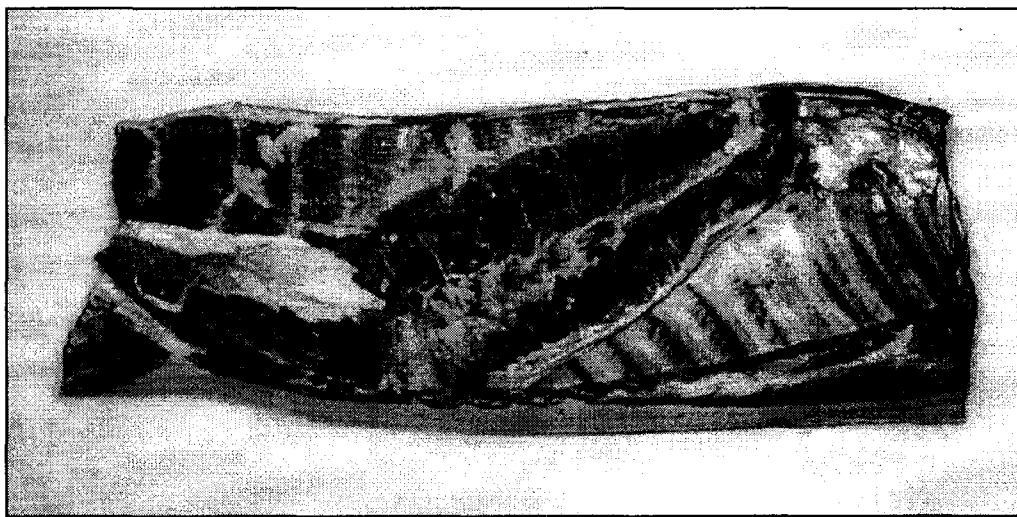


Figure 37 : Flanc de porc



Figure 38 : Côte levée

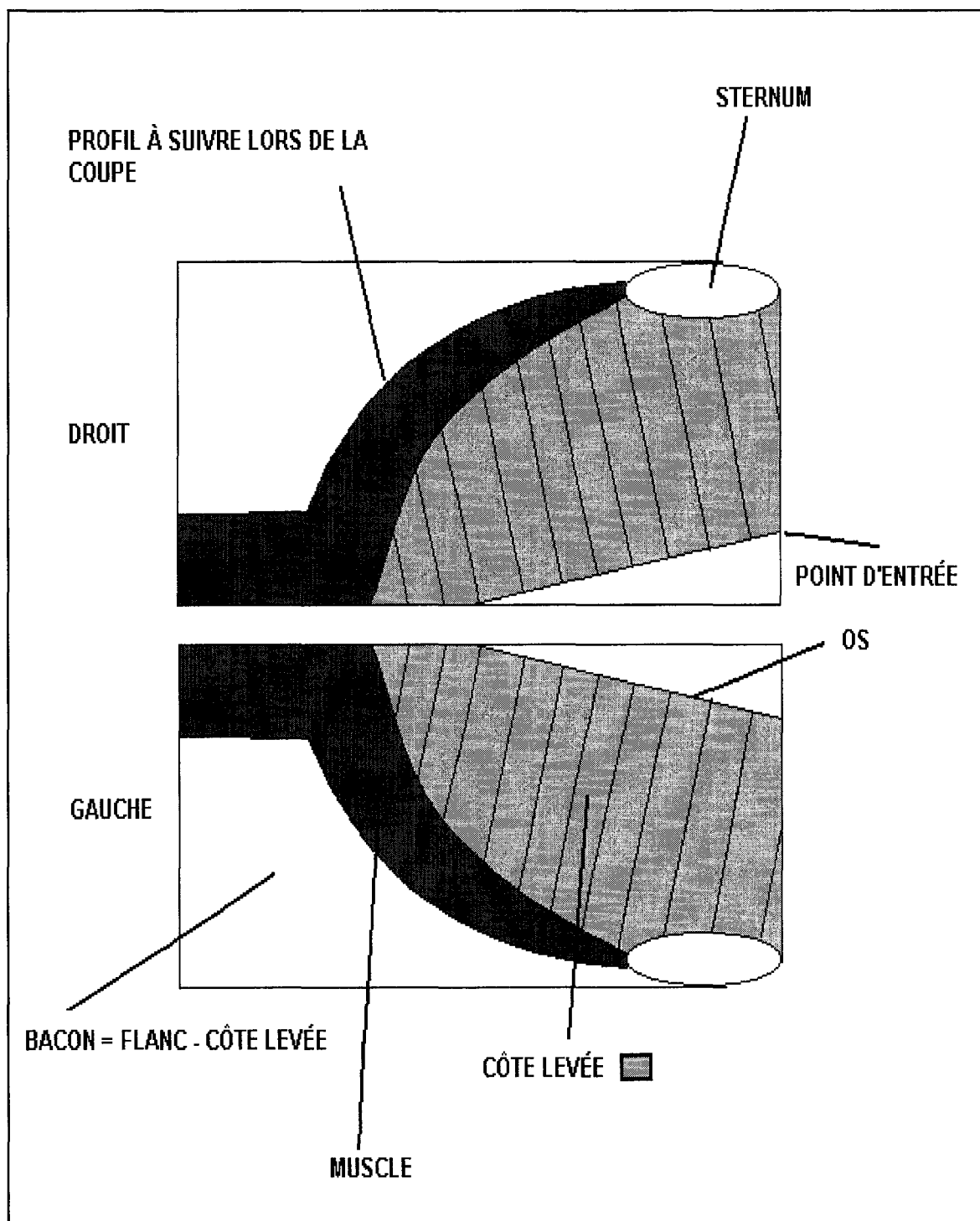


Figure 39 : Flanc schématique

3.3.3 Extraction des caractéristiques

L'algorithme de détection du côté combine une approche heuristique et la méthode des K plus proches voisins. Les routines de traitement d'image créent un vecteur de caractéristiques qui contient les mesures suivantes :

- a. Orientation du muscle ;
- b. Largeur du muscle divisé par la largeur du flanc ;
- c. Aire sous l'os.

Les deux premières mesures sont utilisées par un algorithme heuristique tandis que la dernière mesure est destinée à la méthode des K plus proches voisins. Leur extraction s'effectue en utilisant deux algorithmes distincts qui utilisent les informations de topologie et d'intensité.

3.3.3.1 Description de l'extraction du muscle et de ses caractéristiques

Le modèle de détection des côtés gauche et droit utilise des algorithmes de traitement d'images classique, comme la morphologie et l'analyse individuelle pour l'extraction du muscle. Ensuite, un système de décision basé sur une logique ET des variables obtenues par hystérésis est appliqué. La Figure 40 montre l'algorithme général de traitement.

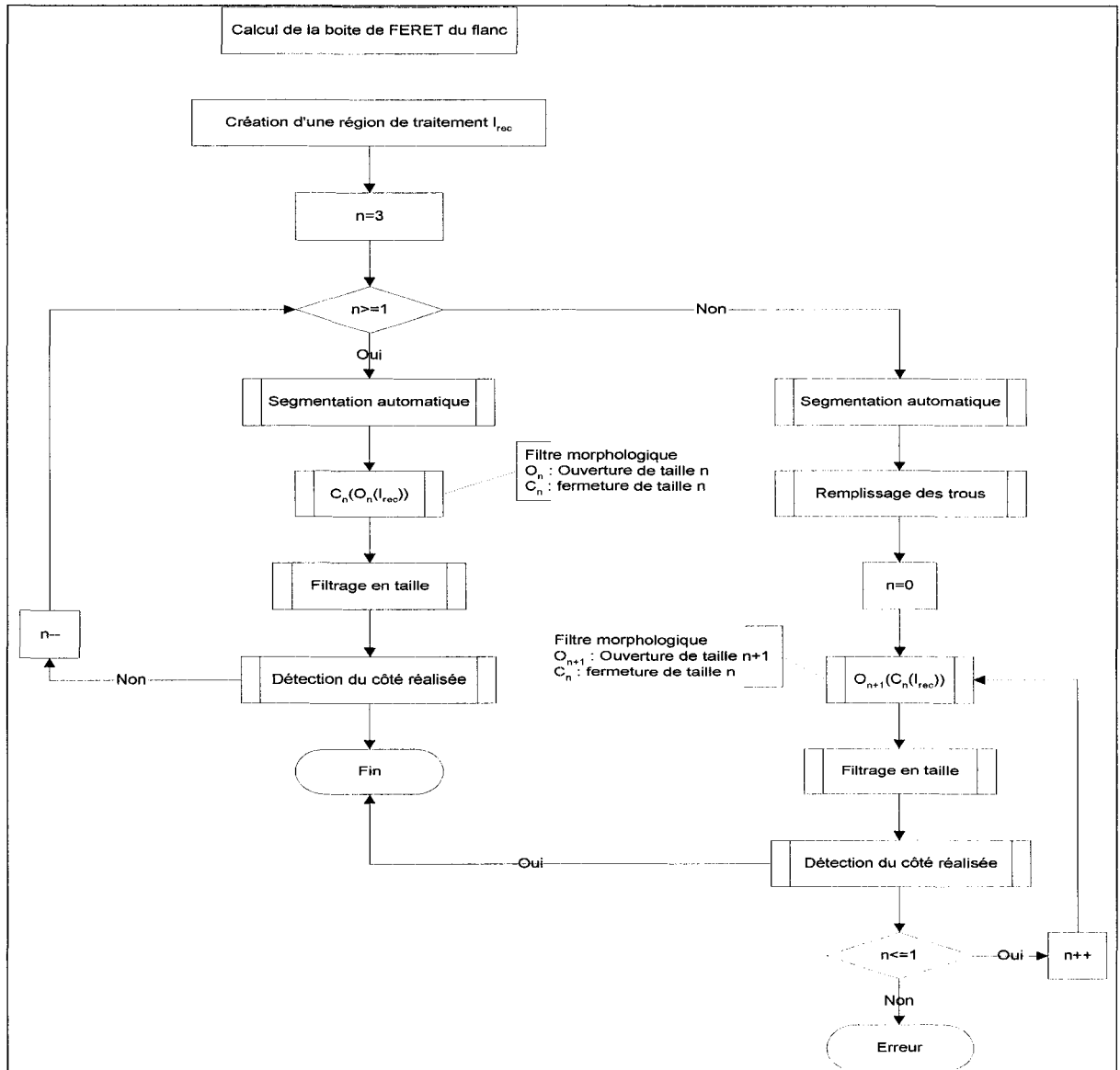


Figure 40 : Description de l'algorithme

3.3.3.1.1 Seuillage Automatique

L'algorithme de reconnaissance du flanc repose sur une segmentation adéquate du muscle, à savoir une bonne discrimination entre les pixels de la viande et ceux du gras.

L'image d'intensité (Figure 41-a) est utilisée comme donnée d'entrée. Une procédure simple consiste à comparer les niveaux de gris de ces pixels par rapport à un seuil. En dessous de ce dernier, les pixels appartiennent à une classe et au-dessus à une autre. Une région d'intérêt localisée (Figure 41-b) sur le muscle avait été choisie pour définir ce seuil à partir de l'histogramme (Figure 42) de cette zone [POS87]. Cette méthode donnait des résultats approximatifs pour les raisons suivantes :

- a. Chevauchement des intensités entre le gras et la viande ;
- b. Variation des intensités dans le temps due à la quantification de l'image, du changement de couleur de la viande (génétique, abattage,...) ;
- c. Mauvais positionnement de la fenêtre à cause de l'altération du flanc lors d'une manipulation antérieure.



Figure 41 : Seuillage du muscle à partir de l'histogramme.

Pour ces raisons, une méthode automatique a été envisagée. Une zone d'intérêt assez large et indépendante des aléas précédents a été retenue pour appliquer l'algorithme de Otsu [OTS79]. Cette méthode a l'avantage d'être non-paramétrique et non-supervisée. Cet algorithme donne de très bons résultats (Figure 43) et est rapide. Cependant, cette

méthode n'utilise pas la variance intra-classe ce qui peut conduire à un mauvais choix de la valeur de seuillage, laquelle peut se retrouver à l'intérieur de la classe ayant la plus grande variance [CHE98].

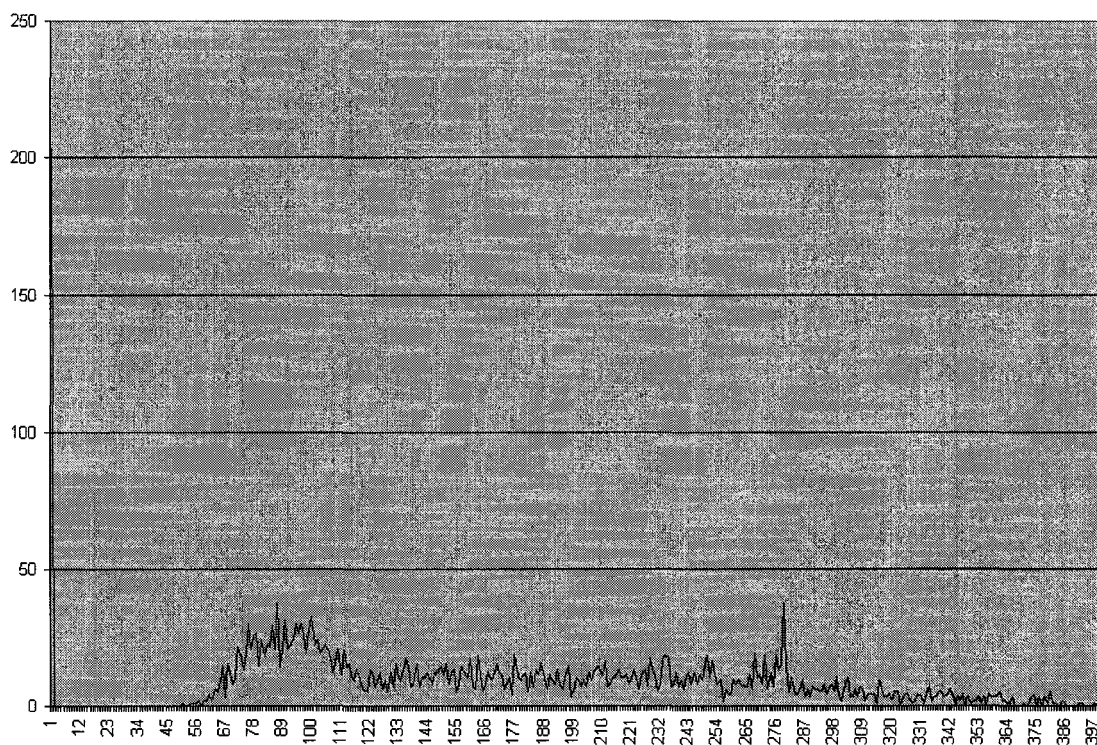


Figure 42 : Histogramme de l'image précédente

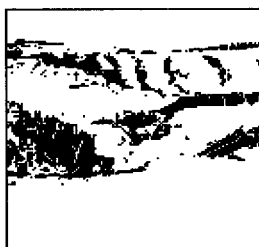


Figure 43 : Image binarisée comprenant l'objet et le fond.

3.3.3.1.2 Reconstruction du muscle par filtre morphologique

Le muscle contient des « bruits additifs et soustractifs ». Lorsque le gras contient du sang ou quand tout simplement une trop faible résolution de l'image lie le muscle recherché avec d'autres, le muscle est sur-segmenté dû au bruit « additif ». Par contre lorsque la présence de panne altère la connexité du muscle, voire à le faire disparaître complètement, ce dernier est sous-segmenté à cause de bruit « soustractif ». L'utilisation de filtres alternés séquentiels [VIN91], permet de résoudre ce dilemme. Il s'agit dans notre cas d'une séquence d'ouverture (O_n) [SER83] et de fermeture (F_n) [SER83] binaires itératives avec des tailles d'élément structurant diminuant ou augmentant selon le filtre. Généralement, l'implantation de cet algorithme consiste à garder la taille de l'élément structurant fixe et à utiliser un plus grand nombre d'itérations n . La stratégie utilisée est d'abord de supprimer « les bruits additifs » en utilisant une ouverture binaire qui agit comme filtre puisqu'elle ne laisse passer que les parties de l'image qui contiennent l'élément structurant translaté. Ensuite, une fermeture de même taille et de même élément structurant est appliquée pour permettre de reconstruire le muscle. Le nombre d'itérations ou la taille de l'élément structurant diminue à chaque itération ce qui permet de s'adapter au niveau de bruit présent. L'algorithme passe donc d'une phase « agressive » (Figure 44) à cause de la nécessité de supprimer beaucoup de bruit à une approche plus lisse due à la présence de peu de bruit (Figure 45). L'algorithme utilise l'image binaire du muscle (Figure 44-a) et applique la transformation suivante $F_3(O_3(I_{\text{binaire}}))$. La Figure 44-b présente le résultat. A cette étape, la fonction de décision est appliquée pour savoir s'il s'agit d'un flanc droit ou gauche. Si l'algorithme ne peut prendre de décision, une nouvelle image du muscle est générée pour une nouvelle taille d'élément structurant. La Figure 44-c ($F_2(O_2(I_{\text{binaire}}))$) et la Figure 44-d ($F_1(O_1(I_{\text{binaire}}))$) montrent les images du muscle pour différentes itérations. Pour chaque étape, la fonction de décision est appliquée pour savoir s'il s'agit d'un flanc droit ou gauche. Si l'altération du muscle est trop prononcée, le filtre précédent $F_n(O_n(I_{\text{binaire}}))$ ne permet pas de prendre une décision.

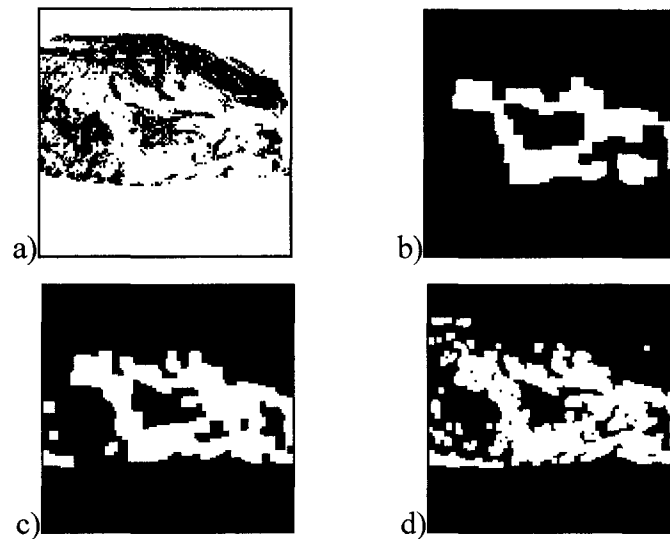


Figure 44 : Filtre $F_n(O_n(I_{\text{binaire}}))$

Un second filtre $O_{n+1}(F_n(I_{\text{binaire}}))$ est utilisé, lequel permet de supprimer le « bruit soustractif ». Une fermeture binaire F_n est utilisée pour réunifier les objets connexes voisins sans expansion de ces derniers (Figure 45). La notion de proximité est déterminée par la taille de l'élément structurant. Ce dernier augmente à chaque itération. Ensuite, une ouverture binaire O_n dont la taille de l'élément structurant est augmentée d'une itération par rapport à la fermeture, est appliquée pour réduire les artéfacts sur la prise de décision. L'algorithme utilise l'image binaire du muscle (Figure 45-a) et applique la transformation suivante $O_2(F_1(I_{\text{binaire}}))$. La Figure 45-b présente le résultat. A cette étape, la fonction de décision est appliquée pour savoir s'il s'agit d'un flanc droit ou gauche. Si l'algorithme ne peut prendre de décision, une nouvelle image du muscle est générée pour une nouvelle taille d'élément structurant. La Figure 45-c ($O_3(F_2(I_{\text{binaire}}))$) présente le résultat pour cette nouvelle itération. De nouveau, la fonction de décision est appliquée.

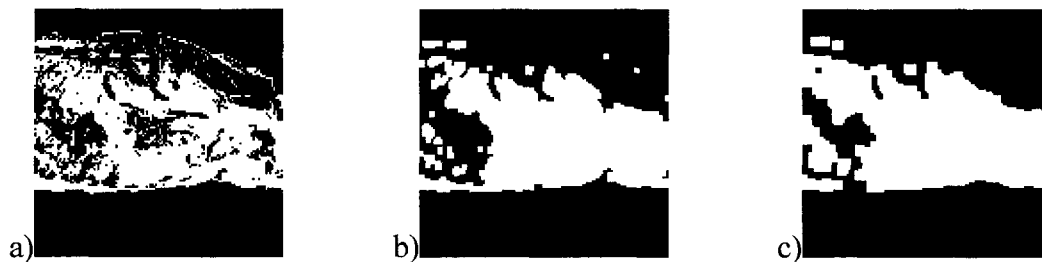


Figure 45 : Filtre $O_{n+1}(F_n(I_{\text{binaire}}))$

3.3.3.2 Description du calcul de l'aire sous l'os

L'approche qui a été retenue consiste à extraire la ligne de coupe des os à partir de l'image de topologie (Figure 46) et à regarder la balance de viande restant en dessous de cette droite. La transformée de Hough [LEA92] est utilisée pour déterminer la droite. Un gradient directionnel est appliqué dans une région d'intérêt localisé (Figure 47-a). Le gradient maximal de chaque colonne est retenu pour générer une image binaire (Figure 47-b). Ces points de l'espace image sont utilisés par la transformée de Hough pour détecter la droite. L'espace de Hough (Figure 48, Figure 49-a) correspond à la représentation des votes pour un ensemble de droites possibles. Le pic maximal (Figure 49-b) est extrait pour avoir la droite la plus représentative des points obtenus par le gradient directionnel. Cette dernière est générée dans une image (Figure 47-c) [FOL93] puis épaissie (Figure 47-d) en utilisant l'opération morphologique D_3 (dilatation de taille 3). Elle est alors utilisée dans une combinaison logique avec la région d'intérêt binarisée (Figure 47-e) pour donner la partie de la pièce de viande qui est en dessous de la ligne des os (Figure 47-f). Après une fermeture, l'aire de cette région est alors calculée et

utilisée comme caractéristique par un algorithme de décision. La méthode du plus proche voisin sert à discriminer les flancs droits des gauches.

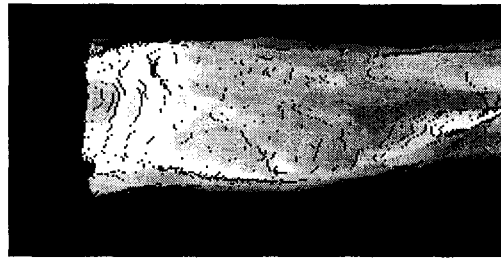


Figure 46 : Image de topologie originale



Figure 47 : Résultats de l'algorithme de detection du côté

Le principe de l'algorithme repose sur la nature géométrique de la pièce de viande. En effet, le sommet du sternum comme la ligne de coupe des côtes sont localisés de façon symétrique par rapport à l'axe longitudinal de la pièce de viande. De plus, ils permettent de générer une ligne droite. La seule différence consiste dans la portion de viande qui se trouve au dessous de cette droite. En effet, la quantité de viande au dessous du sternum est très faible en comparaison de celle que l'on peut trouver en dessous de la ligne des côtes. Une fois la segmentation de l'information réalisée (Figure 47-f), une analyse individuelle est effectuée pour calculer cette aire. Cette mesure est une utilisé comme caractéristique pour la classification. Le choix du classificateur s'est porté sur la méthode de décision des K plus proches voisins. Les raisons sont les suivantes :

a) Facile à coder dans un langage de programmation.

- b) Permet des rejets.
- c) Classificateur non-paramétrique.

Un prototype de classe inconnu est identifié à un côté si la distance entre celui-ci et un des prototypes de référence est minimale. On peut aussi considérer plusieurs voisins. Le nombre K de voisins est variable et est généralement déterminé lors de l'apprentissage. La règle de décision devient comme suit : la classe la plus représentée parmi les K voisins les plus proches identifie le prototype de référence.

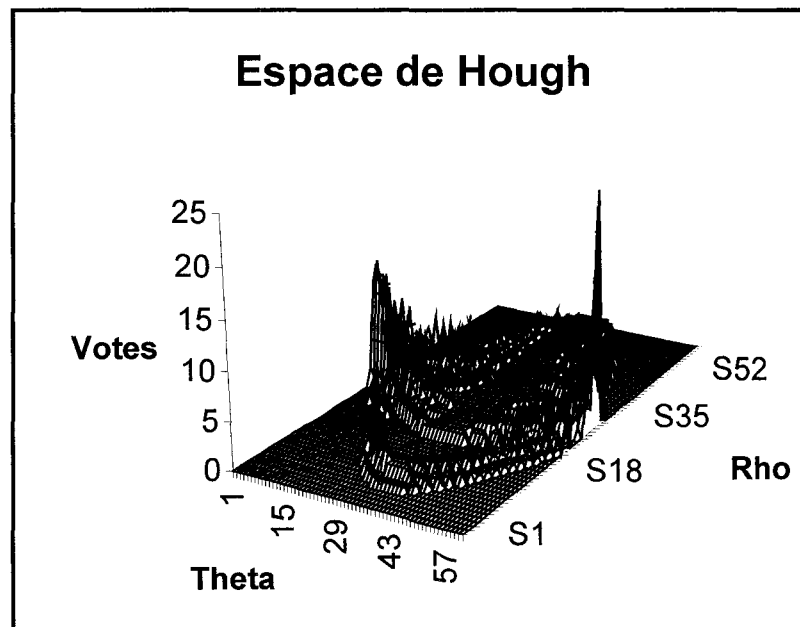


Figure 48 : Représentation 3D de l'espace de Hough

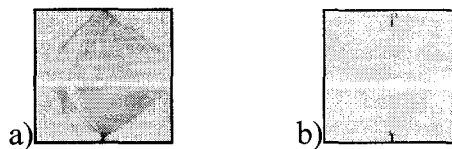


Figure 49 : Extraction des maxima locaux dans l'espace de Hough

L'ordinogramme de la séquence complète de l'algorithme est présenté à la Figure 50.

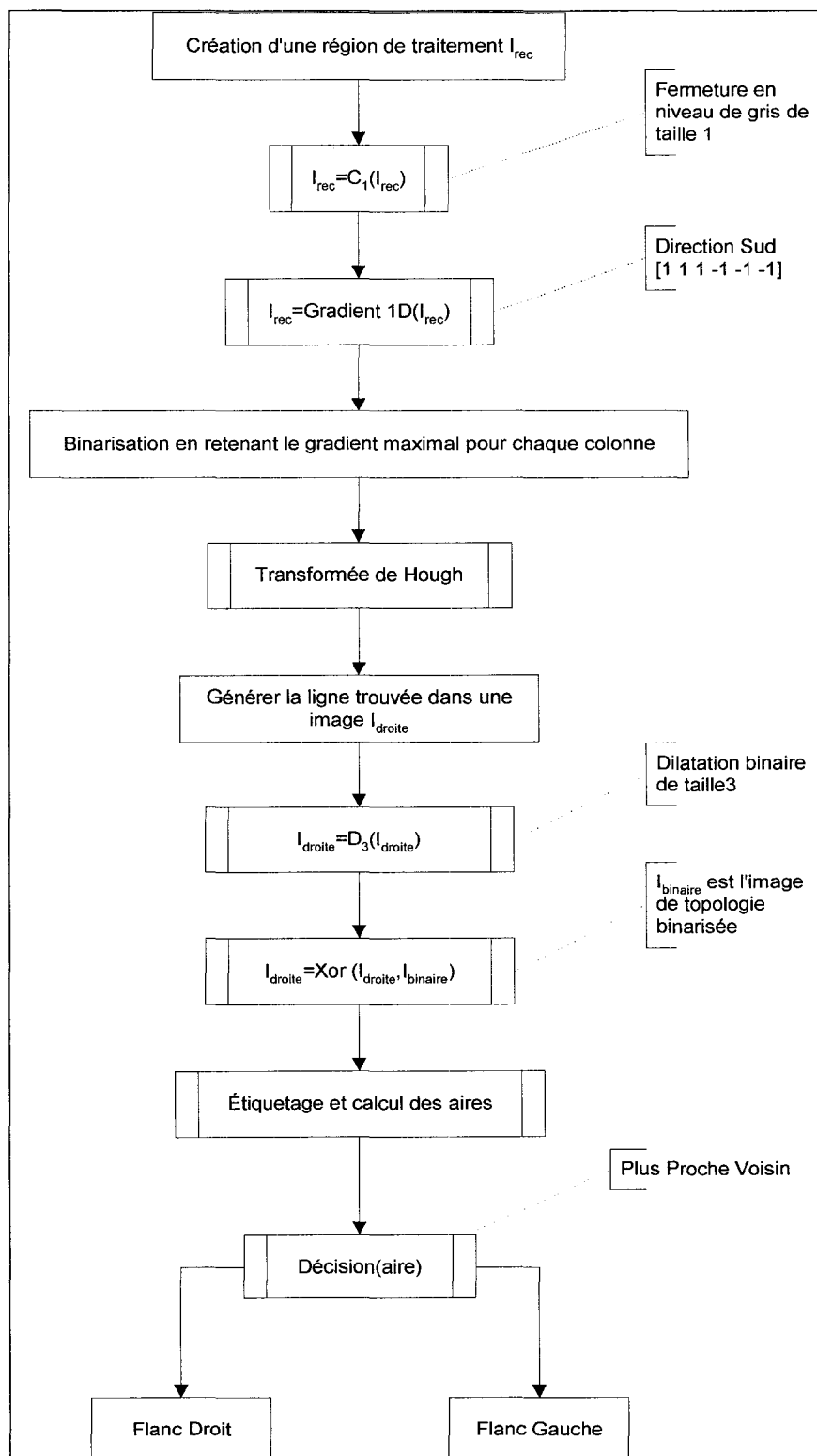


Figure 50 : Description de l'algorithme

3.3.4 Conclusion

Cette étude dans la reconnaissance du côté du flanc permet de mieux comprendre l'importance de l'acquisition des images de topologie et d'intensité. La fusion des données, c'est à dire l'utilisation conjointe de ces deux images dans l'extraction des caractéristiques permet un taux de reconnaissance de 97,7 pour cent avec un taux de rejet de 0,25 pour cent. Les mauvaises classifications sont de 0,05 pour cent.

Classificateur	Bonnes classifications	Mauvaises classifications	Rejets
Fusion	1974 (99,7 %)	1 (0,05%)	5 (0,25%)

Tableau 14 : Résultat du classificateur

3.4 Reconstruction de la surface d'un œil de ronde

3.4.1 Introduction

Le système présenté dans cette section est une étude de faisabilité pour l'élaboration d'une machine pour le dégraissage de l'œil de ronde (bœuf). Le but d'un tel équipement est d'enlever le gras et les membranes situés à la périphérie du muscle.

Ce système comprend donc le module de vision présenté dans ce mémoire pour permettre l'acquisition de l'information nécessaire. Un algorithme localise le gras et les

membranes lesquelles correspondent aux parties blanches dans l'image d'intensité. Ensuite, un autre algorithme prenant en compte la détection précédente génère une trajectoire de coupe pour le robot à partir de l'image topologique.

Dans le cadre de ce mémoire le module de reconstruction de la surface est présenté à titre d'exemple de modélisation 3D. A partir de cette représentation, l'idée est d'optimiser le parcours de la lame pour permettre de respecter le temps de cycle. Seul l'algorithme de reconstruction de la surface va être présenté. La première étape consiste à représenter l'information sous forme de sections ou coupes par analogie à l'acquisition tomographique. Une approximation polygonale est appliquée sur le contour de chaque section ce qui permet de réduire le nombre de points servant à la reconstruction de la surface proposée par Johnson [JOH92].

3.4.2 Description générale

Cette application comprend un axe asservi qui engendre une rotation de la pièce de viande (Figure 51). Le système d'acquisition de données est composé d'un faisceau lumineux généré par un laser et d'une caméra tels que décrit précédemment dans ce mémoire. Durant la rotation de la pièce de viande, le système acquiert des données à un intervalle régulier pour reconstruire une vue complète de la pièce.

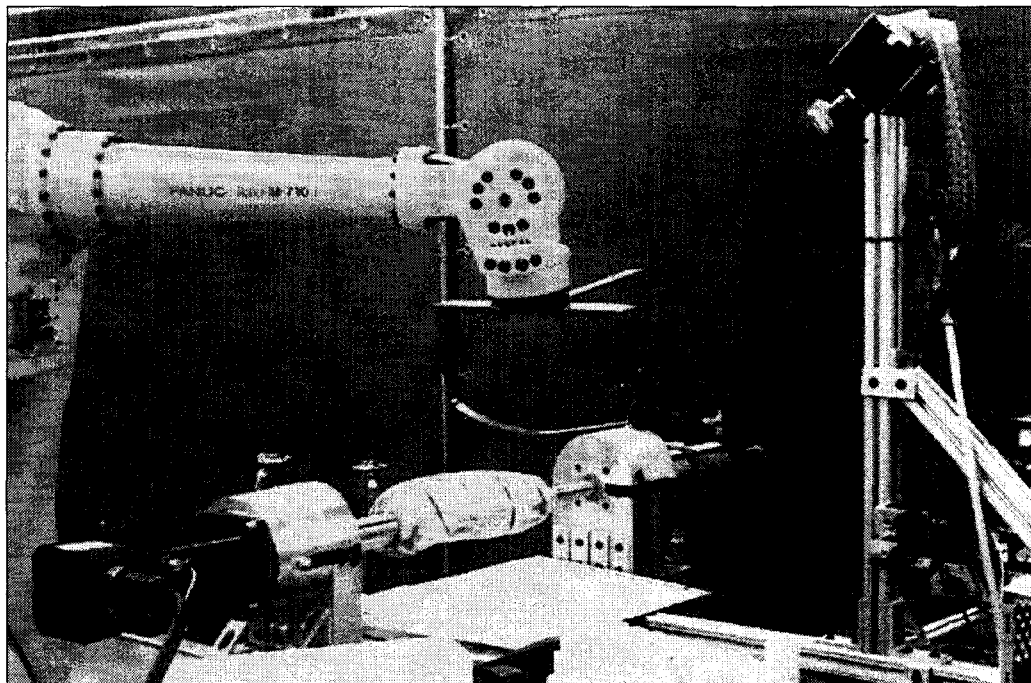


Figure 51 : Montage (CRIQ)

Le système d'acquisition 3D présenté dans ce mémoire génère les images de topologie (Figure 53) et d'intensité (Figure 52). Les parties noires correspondent à des zones d'ombrage, qui sont des endroits où le laser est bloqué par la morphologie de la pièce de viande ce qui conduit finalement à l'absence de toute réflexion.



Figure 52 : Image d'intensité de l'œil de ronde

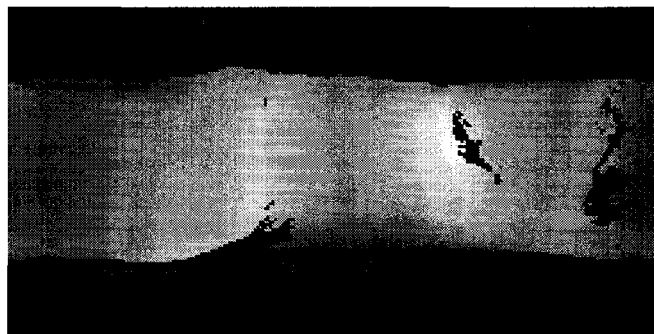


Figure 53 : Image de topologie de l'œil de ronde

Chaque colonne de l'image contient une ligne laser tandis qu'une rangée correspond à une section de la pièce de viande (Figure 54).

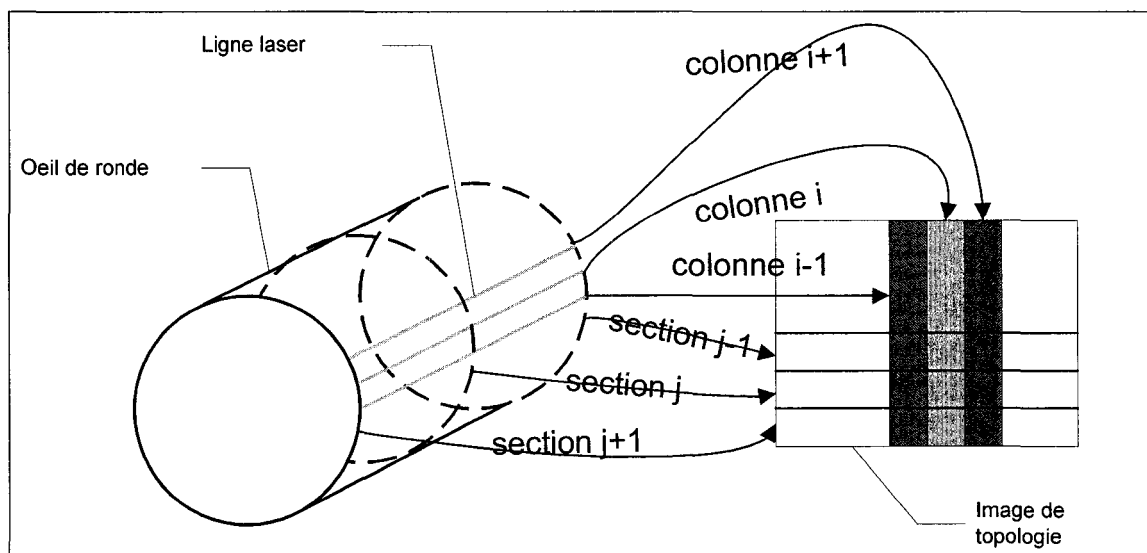


Figure 54 : Création des sections

3.4.3 Modélisation 3D

3.4.3.1 Terminologie

De façon générale, un *contour* est une courbe continue représentée par l'intersection d'un plan et de la surface. Les contours sont habituellement représentés par des polygones 2D. Une *section* est un ensemble de contours qui représente l'intersection d'un plan unique avec un ou plusieurs objets. La *surface* reliant deux contours contenus dans deux sections adjacentes est représentée par un ensemble de triangles, une approximation plane par morceaux de la surface originale.

L'objectif de la reconstruction de surface est de trouver la meilleure représentation possible des contours obtenus par notre système d'acquisition. En général, il existe une infinité de solutions pour représenter notre ensemble de contours. L'algorithme doit donc ajouter une ou des contraintes pour obtenir la meilleure représentation de la surface.

3.4.3.1.1 Décomposition du problème de la reconstruction

Une reconstruction de surface peut être décomposée en quatre sous-problèmes (Figure 55) [MEY92] :

- a. La mise en correspondance ;

- b. Le maillage ;
- c. La ramification ;
- d. L'interpolation de surface.

Le problème de la mise en correspondance ne se pose pas dans le cas de notre application car notre objet ne peut pas avoir plus d'un contour le représentant dans une section. De plus, un seul objet est reconstruit à la fois.

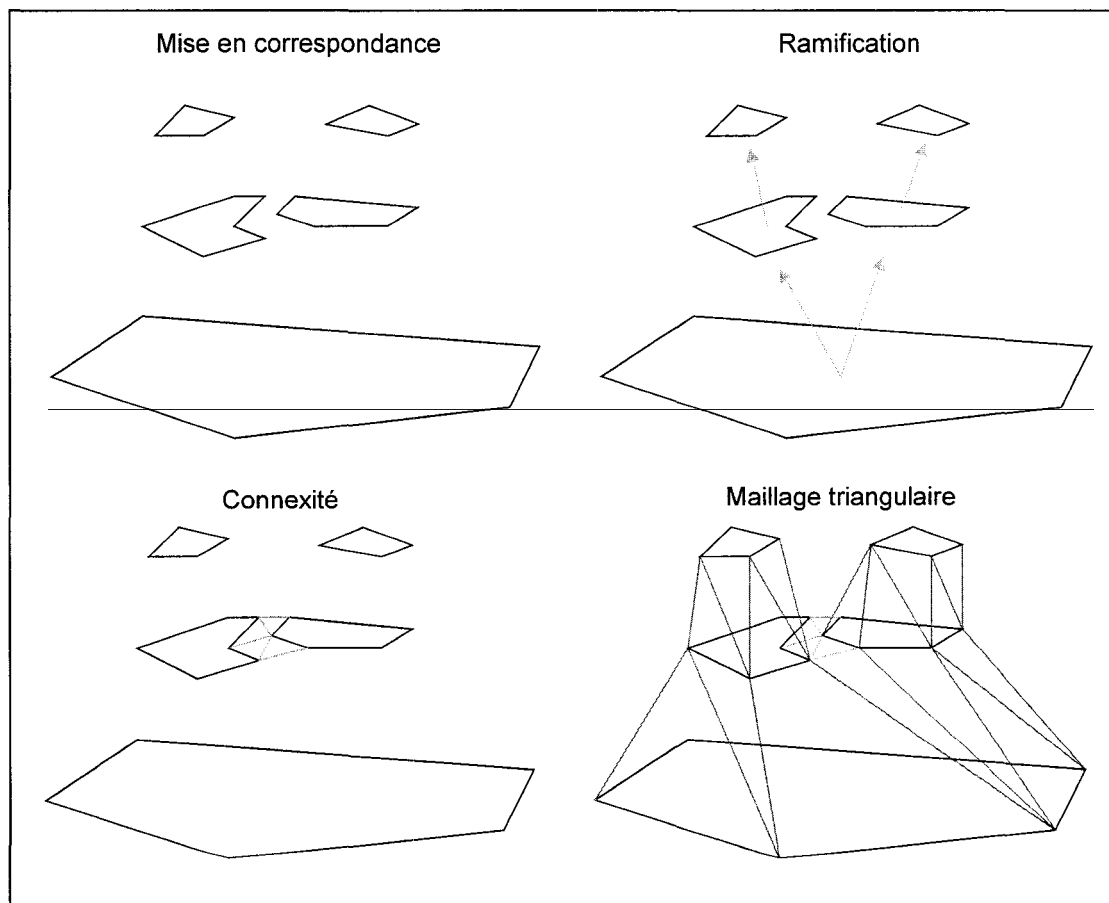


Figure 55 : Différentes étapes de la reconstruction de surface.

Comme l'objet ne comporte aucune ramification, le problème du branchage ne se pose pas. Ainsi, une méthode de maillage imposant d'avoir un contour unique pour chaque section adjacente ne peut être mis en défaut. Après les trois premiers sous-problèmes résolus, un maillage triangulaire est obtenu. Ce dernier représente une approximation plane de la surface constituée de contours. Dans le cadre de notre application, cette représentation est jugée adéquate car elle devrait permettre une bonne qualité de coupe. En effet, cette modélisation est réaliste car les œils de ronde sont stockés dans des boîtes et ainsi ils épousent la forme du contenant passant ainsi d'une forme ovale à rectangulaire.

3.4.3.2 Problème du maillage

De nombreuses méthodes ont été proposées pour réaliser un maillage adéquat qui correspond aux critères suivants :

- a. Une bonne représentation de l'objet parmi les solutions possibles. Keppel [MEY92] a montré que, si deux contours consécutifs possèdent respectivement m et n sommets, alors le nombre d'arrangements T est égal à :

$$T(m, n) = \frac{(m + n)!}{(m - 1)!(n - 1)!} \quad (1-22)$$

- b. Éviter toute intervention d'un utilisateur ;
- c. Permettre le maillage de contours ayant de grandes variations en forme ;
- d. Être rapide et utiliser peu de mémoire.

Malheureusement, aucun algorithme proposé ne semble rencontrer tous ces critères. Dans la littérature, on trouve deux types principaux d'algorithme pour la définition d'une surface à partir des données du contour émergent :

- a. Algorithme « *greedy* » : Ce type d'algorithme porte toujours son choix sur la meilleure solution du moment, c'est-à-dire que le choix est optimal localement ce qui ne conduit pas forcément à une solution globale optimale ;
- b. Algorithme avec l'optimisation d'un critère : Par définition, il s'agit de résoudre un problème par l'obtention de la meilleure des solutions possibles. Cette solution est le maximum (ou minimum) d'une fonction d'optimisation.

Dans le cadre de ce mémoire, la méthode implantée est un algorithme avec l'optimisation d'un critère. Les paragraphes suivants contiennent une brève revue des variantes existantes pour ce type de méthode ainsi qu'une description de l'algorithme implémenté.

3.4.3.3 Méthodes avec optimisation

Le problème de trouver une approximation de la surface au moyen de triangles entre une paire de contours se réduit à une recherche dans un graphe toroïdal [KEP75].

Dans cette méthode, les contours sont représentés par une liste ordonnée de points. Par exemple sur la Figure 56, l'ensemble des points P_i forme un premier contour tandis que l'ensemble des points Q_j en forme un second. Chaque couple de points voisins définit un

segment comme $[Q_j, Q_{j+1}]$. Un couple de points formé d'un point d'un premier contour et d'un autre d'un second contour forme une entretoise. Ainsi, chaque nœud de notre graphe représente une entretoise (Figure 57). Le graphe est une matrice 2D de nœuds qui boucle sur chaque axe. Les arcs sont seulement permis si :

- Les deux entretoises partagent le même point final ;
- Les deux autres sommets des entretoises sont connectés par un segment.

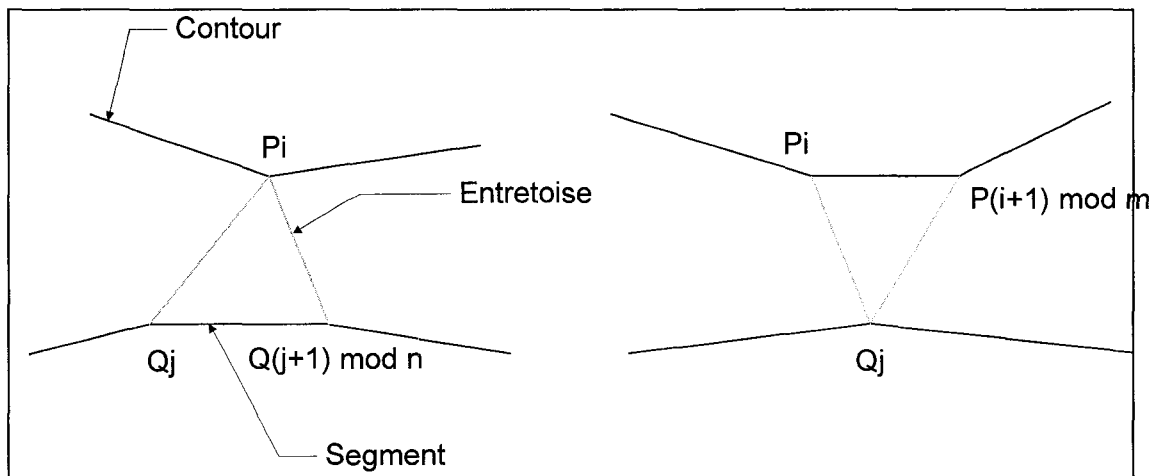


Figure 56 : Maillages élémentaires.

Avec ces contraintes, un arc définit un triangle formé des points terminaux d'un contour et d'un sommet d'un autre. De plus, les arcs ne permettent que des connexions de nœuds qui se trouvent sur la même colonne ou rangée. Les arcs sont orientés de telle façon que le parcours d'un contour se fasse dans la même direction. Des coûts sont alors associés à

chaque arc. Ces derniers doivent être représentatifs du triangle que l'arc représente. La surface reliant deux contours est un cycle du graphe toroïdal.

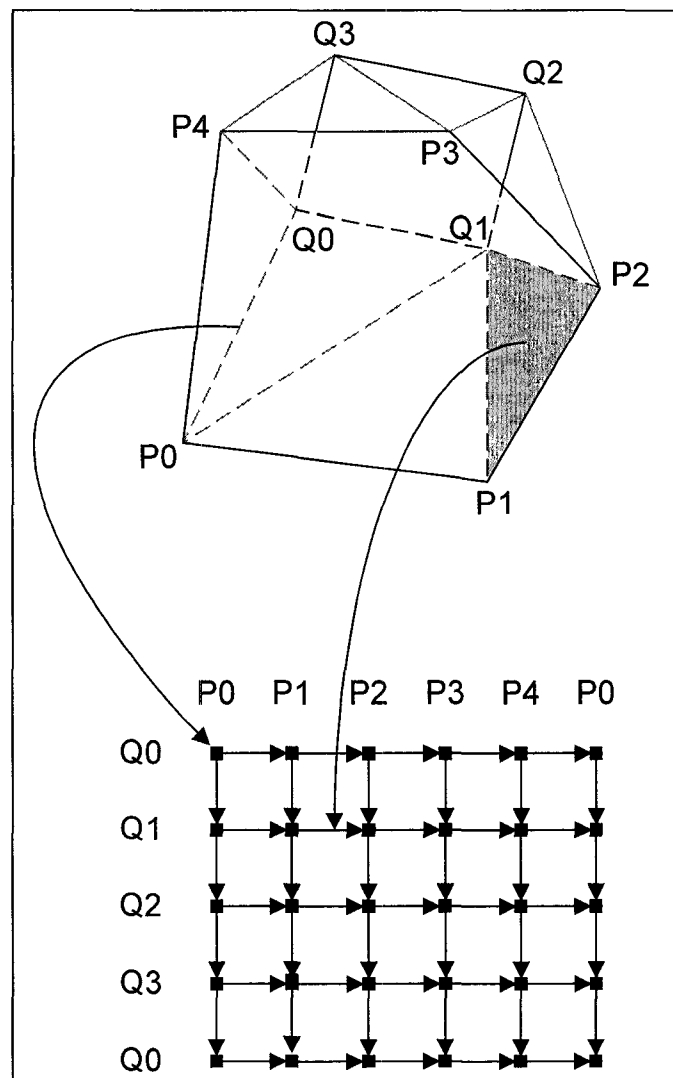


Figure 57 : Contours et son graphe toroïdal orienté.

Le coût associé à un arc est défini par une fonction d'optimisation qui permet de choisir la « bonne » surface. Plusieurs types ont été proposés :

- a. Maximiser le volume de l'objet [MEY92]. Cette méthode est difficile à mettre en œuvre pour les objets non convexes ;
- b. Minimiser l'aire du triangle [FUC77] ;
- c. Utiliser une métrique basée sur la mise en correspondance des directions de points par rapport au centre de masse du contour respectif [COOK83]. Cette méthode est difficile à mettre en œuvre pour les objets à forte concavité ;
- d. Métriques non locales [WAN85] : Les mesures précédentes sont locales car elles assignent un coût à un arc en considérant le triangle associé à cet arc. La métrique proposée tient compte d'un coût individuel pour le triangle mais aussi des coûts de ses voisins. On affecte au départ une valeur à chaque triangle, puis au moyen d'une procédure de relaxation on modifie ces affectations.

3.4.4 Implantation

La première partie de ce travail consistait à réaliser une approximation polygonale pour réduire le nombre de points à considérer dans la reconstruction de surface. Deux méthodes ont été évaluées. La première est l'algorithme de division et de fusion [PAV74], la seconde est la méthode du cône [SLA80].

3.4.4.1 Approximation polygonale

3.4.4.1.1 Définition

Étant donné un ensemble de points $S = \{X_i, Y_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$, une approximation polygonale détermine le nombre n tel que S est divisé en n sous-ensembles S_1, S_2, \dots, S_n

où chaque segment est représenté approximativement par un polynôme d'ordre 1 avec une erreur qui est moins qu'une valeur spécifiée.

3.4.4.1.2 Division et fusion

L'algorithme de Pavlidis [PAV74] propose une erreur locale, c'est-à-dire qui est associée à chaque segment et une autre globale qui correspond à l'ensemble du contour. La convergence de cet algorithme est atteinte quand ces deux critères sont vérifiés. La méthode de division et fusion consiste à diviser le contour de façon à atteindre des erreurs acceptables pour chaque segment créé ainsi que pour l'ensemble du contour, puis de regrouper certains segments pour obtenir une meilleure définition du contour selon les critères d'erreur déjà établis. Le calcul de l'ajustement des points de contrôle peut être accéléré si on réunit des segments adjacents qui ont des coefficients approximatifs et si on sépare des segments avec une erreur trop grande. La réunion de segments conduit par contre à l'augmentation de l'erreur sur le segment.

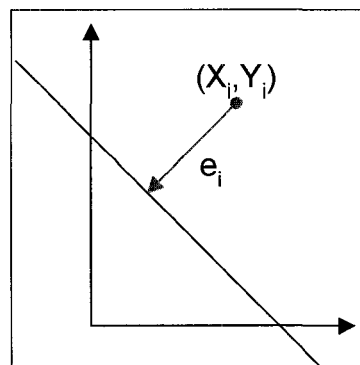


Figure 58 : Calcul de l'erreur.

Les deux types de norme d'erreur les plus communément utilisés sont :

$$E_2 = \sum e_i^2 \text{ pour les } (x_i, y_i) \in S_k.$$

et

$$E_{\infty} = \max(e_i) \text{ pour les } (x_i, y_i) \in S_k.$$

La lenteur de l'algorithme, malgré une bonne qualité dans l'approximation du contour, et la difficulté de quantifier les erreurs nécessaires à l'approximation, ont conduit au développement de la deuxième approche.

3.4.4.1.3 Méthode du cône

La méthode développée par Slansky[SLA80] obéit à trois règles :

- a. Règle 1 : Un segment est valide si tous ses points sont à l'intérieur ou tangents aux ouvertures circulaires de rayon ε ;
- b. Règle 2 : Quand les deux rayons associés avec $TCONE_p$ et $BCONE_p$ se croisent alors aucun point ne peut plus obéir à la règle 1. $TCONE_p$ et $BCONE_p$ sont respectivement l'angle entre la tangente supérieure et l'axe positif des X et l'angle entre la tangente inférieure et l'axe positif des X ;
- c. Règle 3 : Si l'angle du segment courant avec l'axe positif des X n'est pas compris entre $TCONE_p$ et $BCONE_p$, le point terminal du segment est en dehors du cône courant.

L'algorithme nécessite seulement une itération. Le rayon de ε correspond à l'erreur désirée pour le segment.

À la Figure 59, les droites correspondent aux rayons associés à $TCONE_7$ et $BCONE_7$. Le point 8 n'obéit pas à la règle 1.

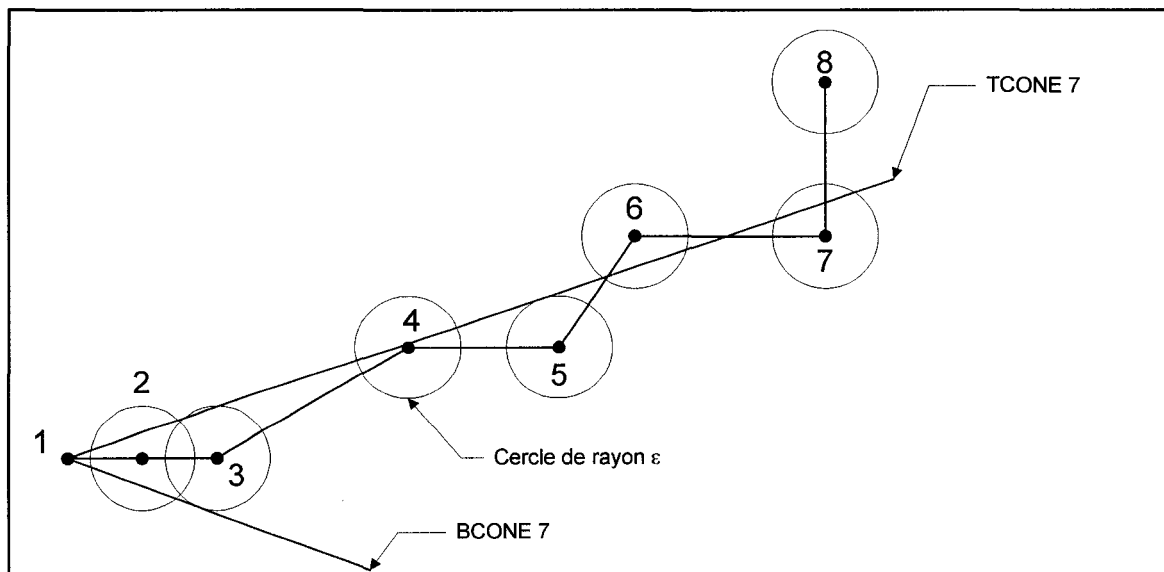


Figure 59 : Illustration de la méthode du cône.

L'annexe 3 contient les résultats de l'approximation polygonale d'un même contour pour différents rayons. Le temps de calcul reste quasi constant pour un même contour pour des rayons différents. Par contre, cet algorithme est sensible au point de départ, contrairement au précédent.

3.4.4.2 Reconstruction de surface

L'algorithme dans ce travail est basé sur l'architecture de Johnson [JOH92] et utilise la minimisation de l'aire du triangle [FUC77]. Keppel [MEY92] a montré que le problème de trouver un arrangement optimal de triangles peut être réduit à trouver le chemin minimal dans un graphe orienté toroïdal. Johnson [JOH92] propose une approche par la programmation dynamique. De plus, il transforme le graphe toroïdal en un graphe planaire.

3.4.4.2.1 Transformation du graphe

Johnson [JOH92] a montré que la transformation d'un graphe toroïdale $G(m,n)$ en un graphe planaire $G(2m,n)$ ne permet pas le croisement des chemins de recherche et de plus, facilite l'implémentation algorithmique (Figure 61). Cette transformation consiste à dédoubler l'information verticalement pour éviter que le graphe ne boucle sur cet axe (Figure 60).

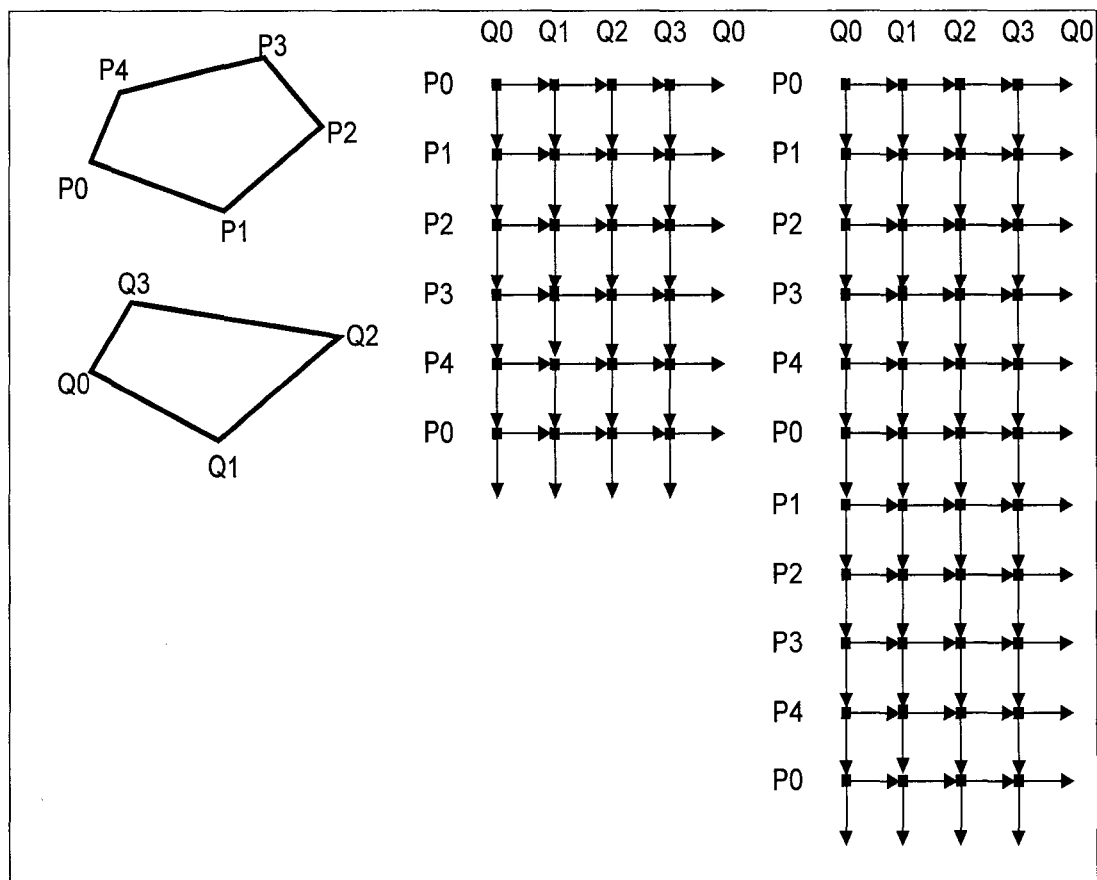


Figure 60 : Transformation d'un graphe toroïdale en un graphe planaire.

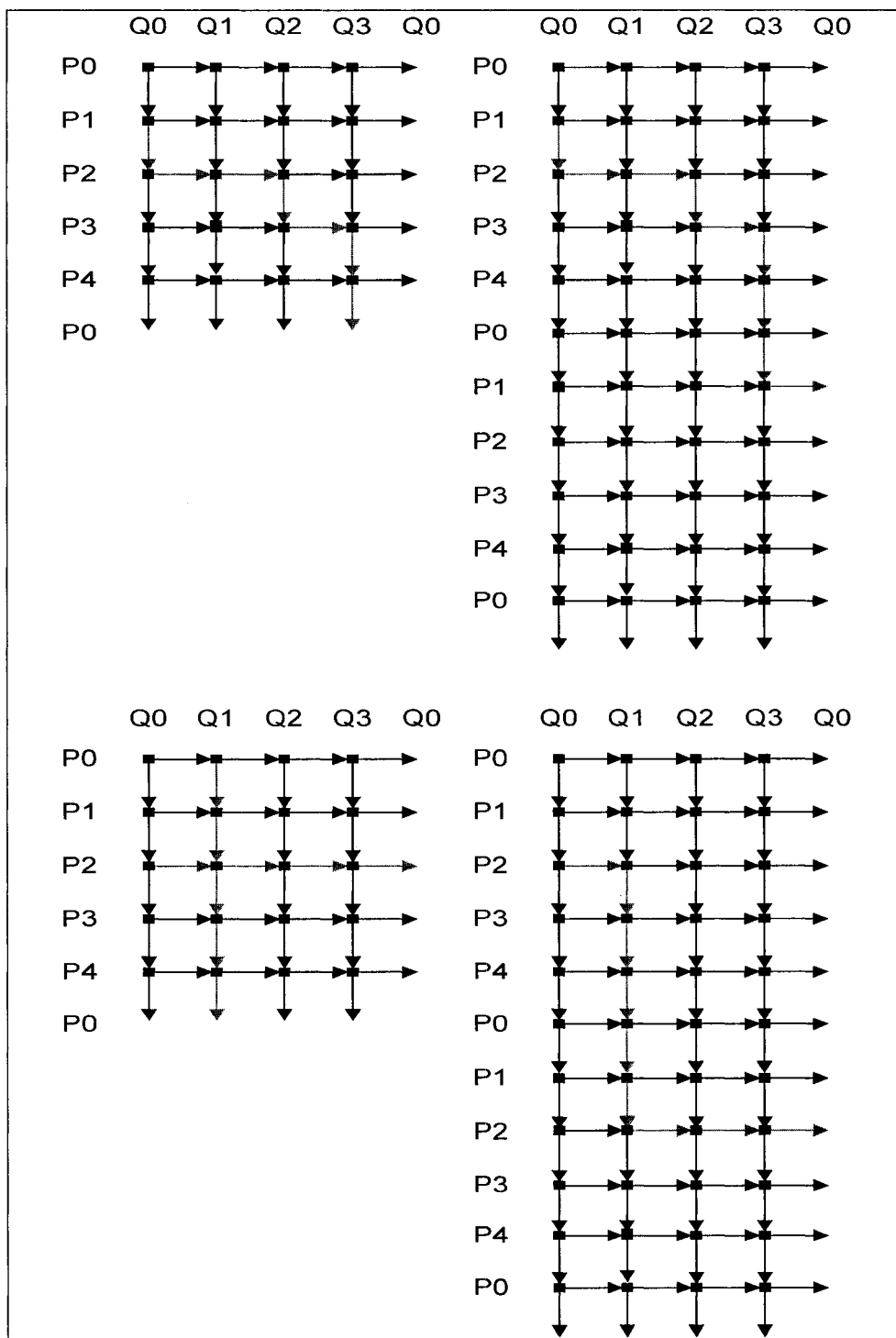


Figure 61 : Exemple de deux chemins dans des graphes toroïdal et planaire.

3.4.4.2.2 Programmation dynamique

L'implémentation de l'algorithme est présentée dans les ordinogrammes suivants. Il est à noter que les limites de recherche sont calculées selon la méthode proposée par Fuchs [FUC77], à savoir que les portions de graphe au-dessus de la limite de recherche inférieure et en dessous de la limite de recherche supérieure sont supprimées. Les régions formées par la suppression de ces sous-graphes sont ensuite divisées en région plus restreinte résultant en un algorithme de tri.

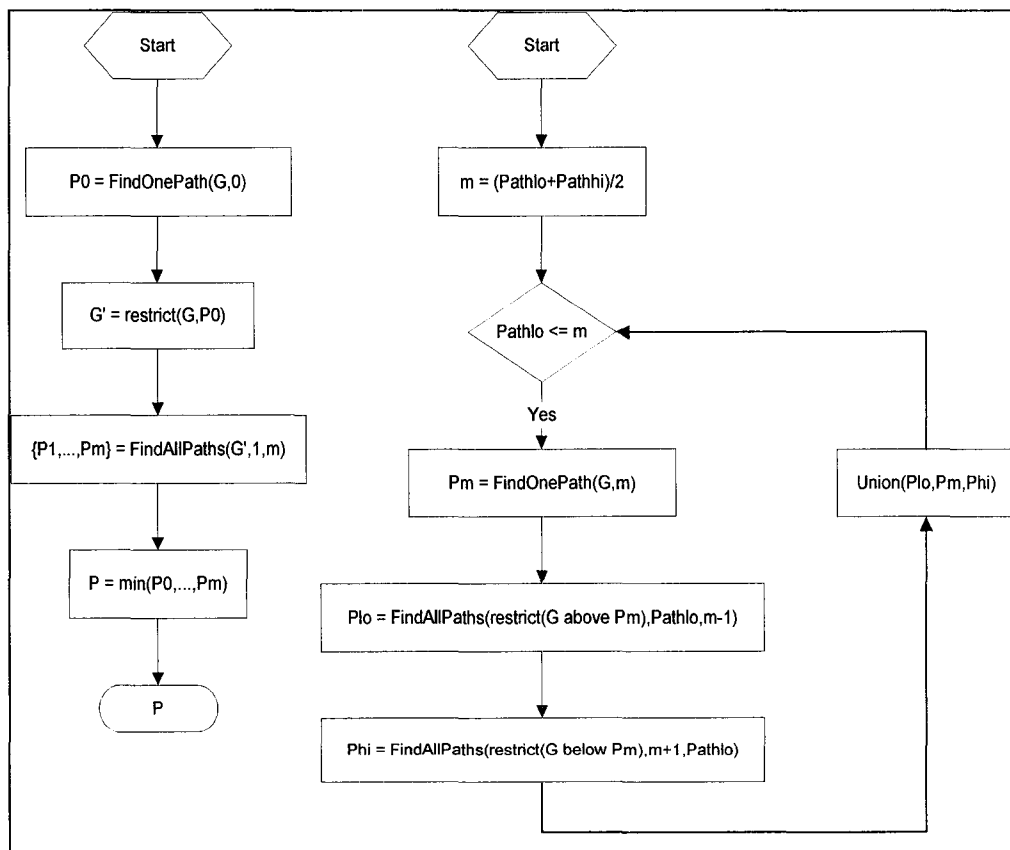


Figure 62 : Ordinogramme

3.4.5 Présentation du logiciel

L'interface du logiciel est présentée dans l'annexe 3. Cette section couvre en détail les différentes fonctionnalités de cet écran. La figure suivante contient les différents paramètres d'entrées de l'algorithme :

1. Image de topologie ;
2. Image d'intensité ;
3. Lignes de visualisation pour les limites inférieure et supérieure de traitement ;
4. Ligne de visualisation pour la section de la pièce de viande actuellement affichée dans la fenêtre graphique voisine ;
5. Fenêtre de saisie pour la valeur de la limite supérieure du traitement de la pièce de viande. Cette valeur peut être aussi fournie au système en utilisant la règle d'ajustement ;
6. Bouton pour sélectionner le fichier contenant les images d'intensité et de topologie, lesquelles seront visualisées dans les fenêtres référencées par 1 et 2 ;
7. Exécute une fonction de pré-traitement d'images pour enlever certains artefacts de l'image de topologie ;
8. Exécute une fonction qui effectue l'approximation polygonale entre les limites de traitement puis la triangulation entre les polygones obtenus. Cette fonction se charge de prendre les données brutes (pixels de l'image) et de les transformer en coordonnées du monde en utilisant l'étalonnage spécifique du montage ;
9. Fenêtre de saisie du rayon utilisée dans la méthode du cône ;
10. Fenêtre de saisie pour la valeur de la limite inférieure du traitement de la pièce de viande. Cette valeur peut être aussi fournie au système en utilisant la règle d'ajustement ;

11. Ligne de visualisation pour le profil de la pièce de viande actuellement affichée dans la fenêtre graphique voisine.

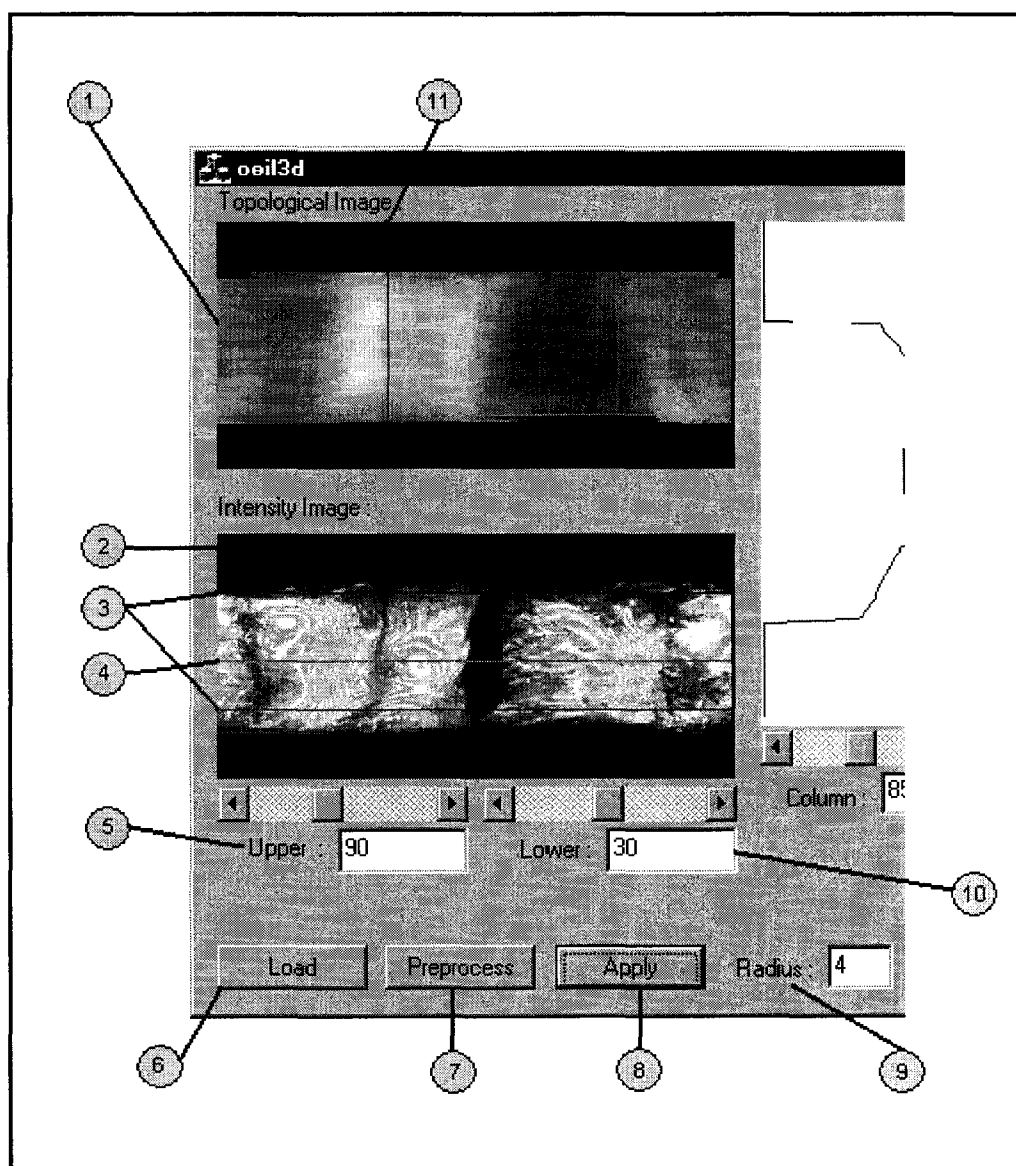


Figure 63 : Écran de saisie des différents paramètres d'entrées.

La Figure 64 présente les différents résultats fournis par le logiciel.

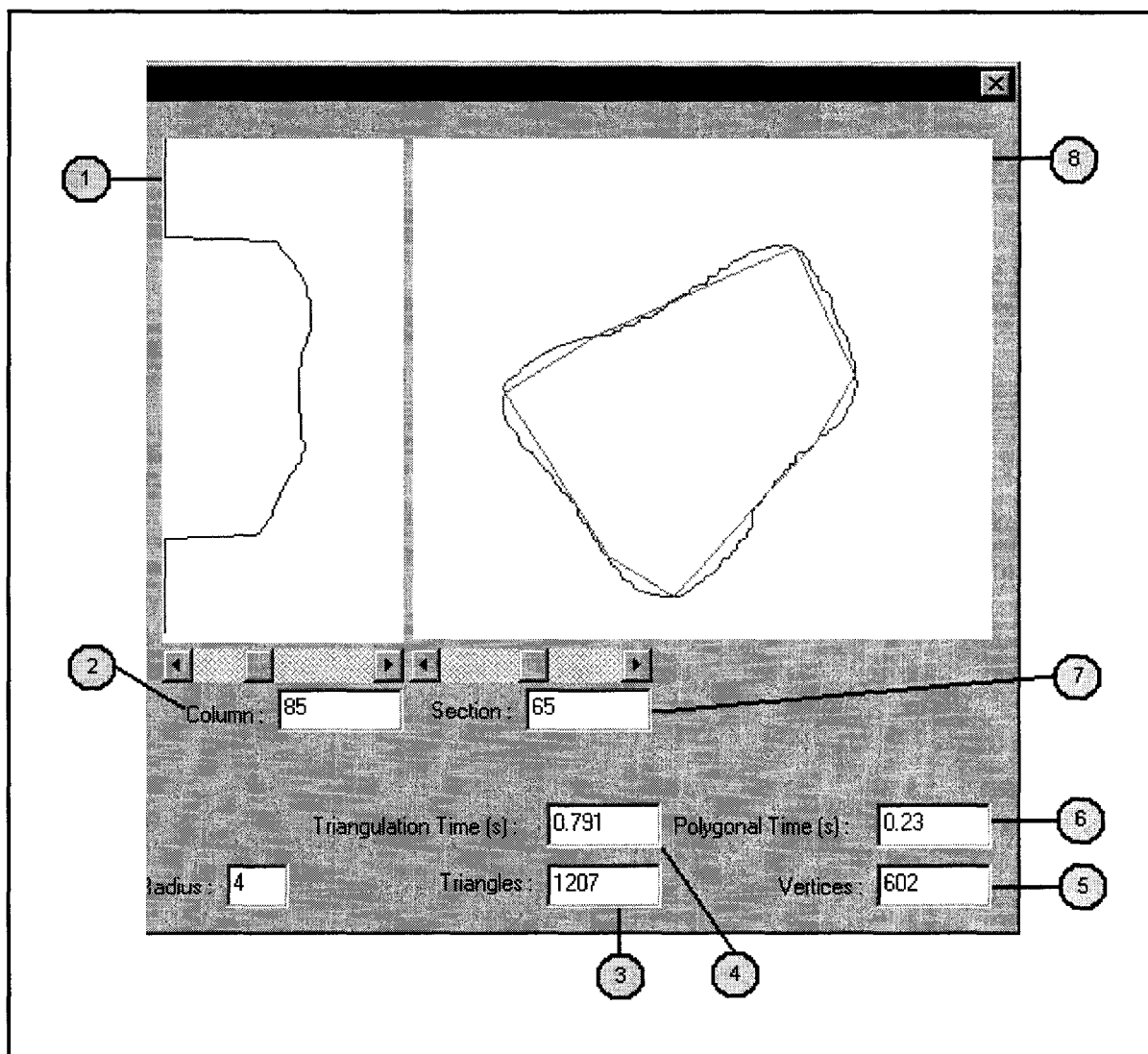


Figure 64 : Données de sortie du logiciel.

La Figure 64 contient les différents paramètres de sorties de l'algorithme :

1. Fenêtre graphique affichant le profil généré par le laser sur la pièce suivante ;
2. Fenêtre de saisie pour l'index du profil que l'on veut afficher. Cette valeur peut être aussi entrée dans le système en utilisant la règle d'ajustement ;
3. Zone d'affichage du nombre de triangles générés par la triangulation ;

4. Zone qui affiche le temps pris pour effectuer la triangulation ;
5. Zone d'affichage du nombre de sommets générés par l'approximation polygonale ;
6. Zone qui affiche le temps pris pour effectuer l'approximation polygonale ;
7. Fenêtre de saisie pour l'index de la section que l'on veut afficher. Cette valeur peut être aussi entrée dans le système en utilisant la règle d'ajustement ;
8. Fenêtre graphique affichant la section de la pièce suivante. La ligne rouge représente le contour brut tandis que la ligne verte représente le contour approché.

3.4.6 Résultats

3.4.6.1 Temps de calcul

Les calculs ont été réalisés sur un TOSHIBA 4080 XCDT (Pentium II, 200 Mhz, 128 Mb) pour une pièce de viande avec soixante sections.

Rayon	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Sommets	346	355	388	427	494	600	686	886	1664
Triangles	619	637	703	782	910	1121	1294	1690	3214
Temps de la triangulation (s)	0,16	0,16	0,16	0,171	0,17	0,21	0,21	0,491	1,472

Tableau 15 : Temps de calcul en fonction du nombre de sommets

Comme le tableau précédent, le temps d'exécution de l'algorithme se comporte en $mn\text{Log}_2(m)$ pour un graphe planaire de dimension m par n .

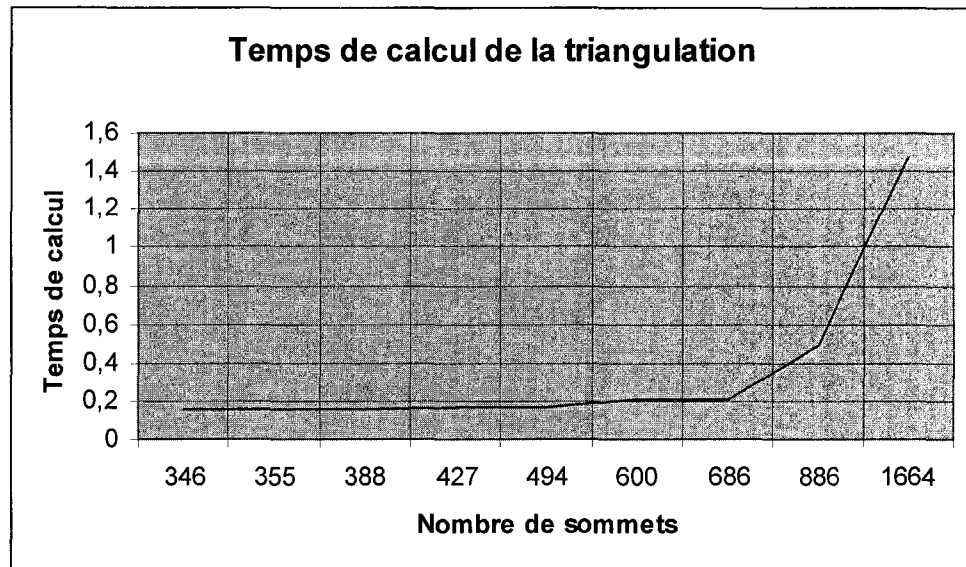


Figure 65 : Temps d'exécution.

3.4.6.2 Affichage dans VRML

Un script VRML a été réalisé pour visualiser le résultat de la triangulation. Un logiciel de visualisation du domaine public CosmoPlayer¹⁴ permet de faire tourner la pièce tout en incorporant plusieurs points de vue.

¹⁴ Téléchargeable à l'adresse <http://www.wb-utwente.nl/pub/net/vrml>.

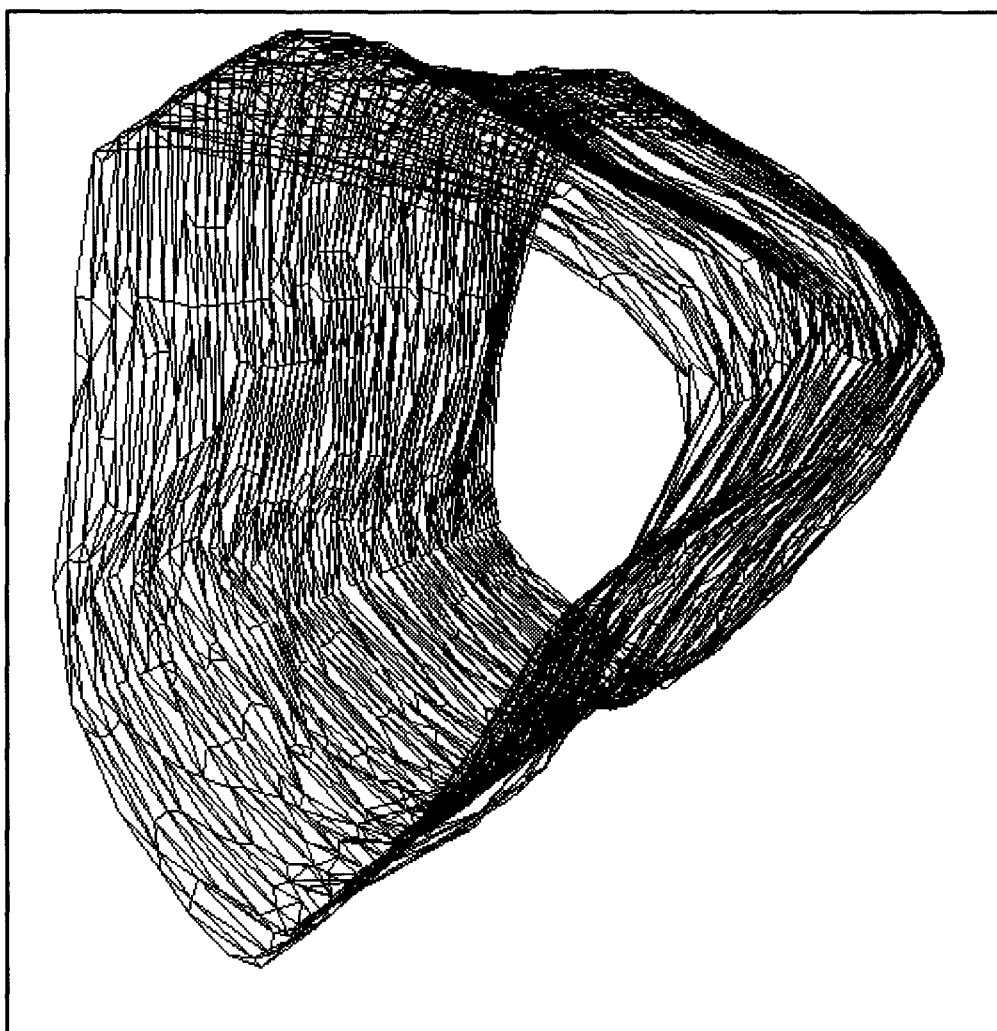


Figure 66 : Vue de coté de la pièce dans VRML (Modèle filaire).

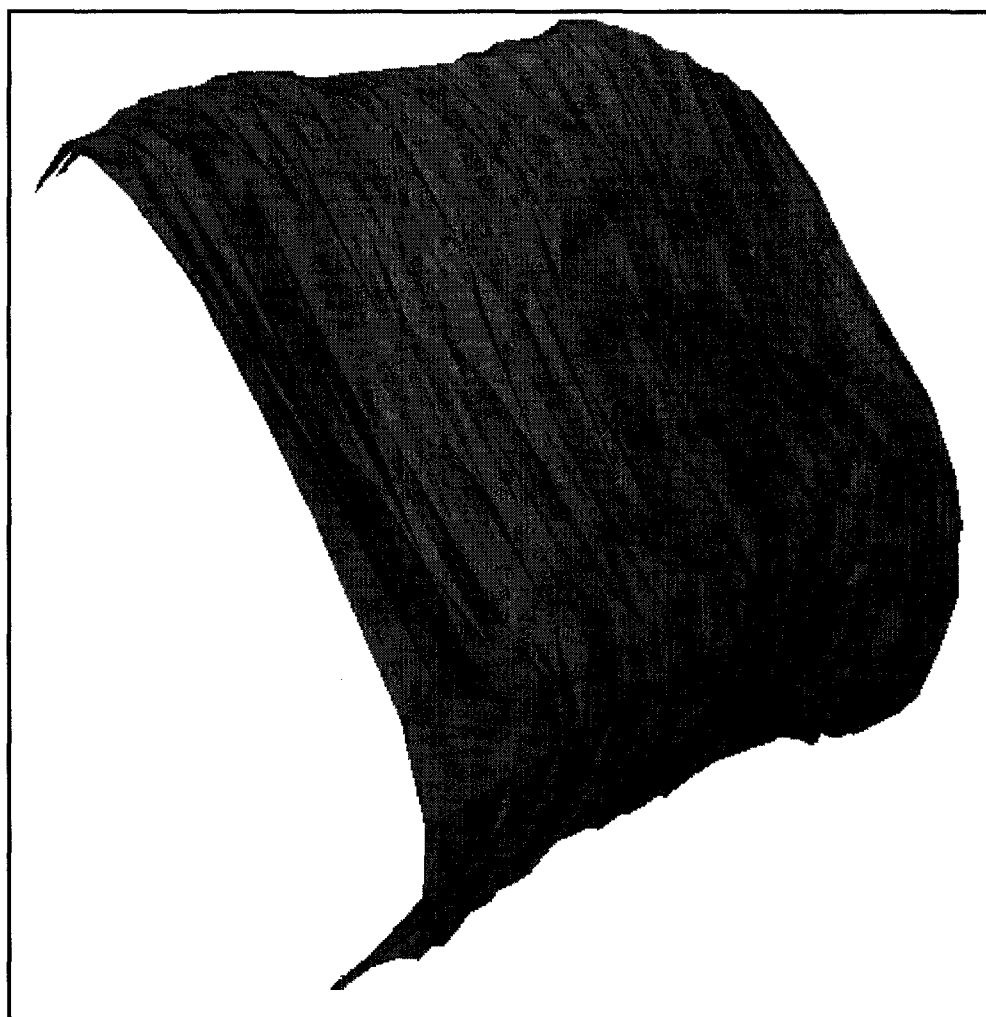


Figure 67 : Vue de coté de la pièce dans VRML (Modèle surfacique)

CONCLUSION

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter un système d'acquisition capable de répondre à différents besoins en automatisation au sein de l'industrie agroalimentaire. Pour atteindre ce but, plusieurs objectifs ont été établis en introduction.

Le premier est d'être capable de numériser l'information suffisante et nécessaire pour les différentes tâches à accomplir comme la reconnaissance de formes ou la génération de trajectoire. Pour ce faire, il a fallu créer une image de topologie et une autre d'intensité. L'utilisation de ces deux types de données permet de reconnaître un flanc droit d'un gauche par exemple.

Pour atteindre les deux objectifs suivants, à savoir créer un système d'acquisition générique pour répondre aux diverses applications et fabriquer un produit industriel, il a fallu utiliser des composantes industrielles standards aussi bien pour l'électronique, l'optique que les logiciels. L'intégration de ces éléments permet de répondre aux critères généraux d'un appareil de mesure à savoir la précision, la répétitivité et la vitesse d'acquisition. Pour ce faire, une approche qui utilise pour l'étalonnage deux hauteurs de référence est utilisée. A partir de cette connaissance a priori, un plan d'étalonnage est établi. Ce dernier est utilisé lors de l'acquisition 3D. La précision et la répétitivité ainsi obtenues avec la méthode proposée sont satisfaisantes dans le domaine d'applications ciblé. Par exemple lors de la séparation de la longe du flanc, chaque mesure appartient à un intervalle de $\pm 3/8$ pouces (9,525 mm) autour d'une valeur cible dans un pourcentage supérieur à 92 %. L'utilisation du bus PCI combiné à la technique d'acquisition avec bascule pour le transfert d'images permet d'obtenir la vitesse désirée. La flexibilité du système d'acquisition est obtenue par l'utilisation d'équipements standards facilement interchangeables.

Les résultats obtenus dans les trois applications présentées dans ce mémoire démontrent la fonctionnalité du système d'acquisition 3D. Ce principe est en mesure de générer l'information adéquate et ainsi de permettre l'application d'algorithmes de plus hauts niveaux pour accomplir la tâche désirée.

Un avantage intéressant de cette approche est que l'étalonnage est effectué automatiquement et rapidement par l'opérateur sur la ligne de production. Un autre aspect positif est l'utilisation d'équipements standards ce qui permet au système d'évoluer à mesure que la technologie des composants progresse. Par contre, il y a deux limitations principales pour le système d'acquisition 3D, qui sont une certaine sensibilité à la présence de distorsion et la vitesse de transfert et d'extraction de la ligne laser. Dans le cadre de ce mémoire, la configuration optique (distance focale, grossissement désiré et distance de travail) ne présente pas des distorsions marquées. Cependant, le système actuel ne permet pas de prendre en compte ce facteur. Actuellement, le temps d'acquisition de l'image est limité par celui d'extraction de la ligne laser dans l'image mémorisée dans l'ordinateur. De nouveaux algorithmes sont donc nécessaires pour permettre l'utilisation de nouvelles technologies encore plus rapides et déjà disponibles dans l'industrie.

ANNEXE 1

Calculs pour pour la triangulation 3D selon l'approche conventionnelle

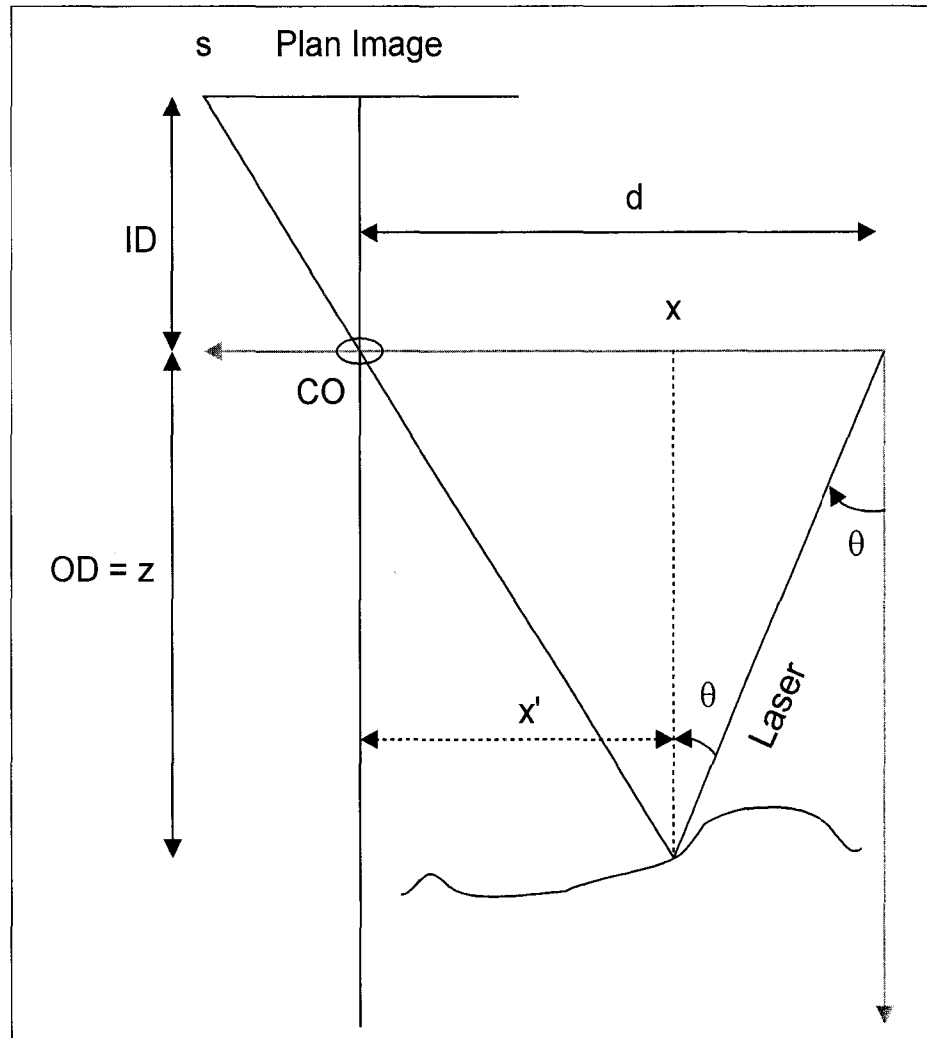


Figure 68 : Approche conventionnelle

Calcul conventionnel de l'équation de hauteur z

La hauteur peut s'exprimer par :

$$\tan \theta = \frac{x}{z} \Rightarrow x = z \tan \theta \quad (1)$$

Physiquement, on a :

$$d = x + x' \quad (2)$$

L'équation optique donne :

$$m = \frac{ID}{OD} = \frac{s}{x'} \Rightarrow x' = \frac{sOD}{ID} = \frac{sZ}{ID} \quad (3)$$

A partir des équations (1), (2) et (3), on a :

$$d = x + \frac{sZ}{ID} = z \tan \theta + \frac{sZ}{ID} = z \left(\tan \theta + \frac{s}{ID} \right)$$

$$z = \frac{dID}{s + ID \tan \theta} \quad (4)$$

L'équation de la lentille est donnée par :

$$\frac{1}{ID} + \frac{1}{OD} = \frac{1}{f}$$

donc

$$\frac{1}{ID} + \frac{1}{z} = \frac{1}{f} \Rightarrow ID = \frac{fz}{z - f} \quad (5)$$

A partir des équations (4) et (5), on a :

$$z = \frac{d \frac{fz}{z-f}}{s + \frac{fz}{z-f} \tan \theta}$$

$$z = \frac{dfz}{s(z-f) + fz \tan \theta} \Rightarrow s(z-f) + fz \tan \theta = df \Rightarrow sz + fz \tan \theta = df + sf$$

$$z = \frac{f(d+s)}{s + f \tan \theta} \quad (6)$$

L'équation de la hauteur z est non-linéaire. Si l'approximation suivante que z est très grand devant f est faite alors on obtient :

$$z = \frac{df}{s + f \tan \theta} \quad (7)$$

Calcul de l'erreur pour l'approche conventionnelle :

La hauteur z est une fonction de s , f , d et θ . La décomposition en série de Taylor de l'équation (6) donne :

$$z = g(s, f, d, \theta)$$

$$\Delta z = \frac{\partial g}{\partial s} \Delta s + \frac{\partial g}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial g}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial g}{\partial \theta} \Delta \theta$$

$$\Delta z = \frac{f(\tan \theta - d)}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta s + \frac{(d+s)(s + f \tan \theta) - f(d+s) \tan \theta}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta f + \frac{f(s + f \tan \theta)}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta d - \frac{\frac{f^2(d+s)}{\cos^2 \theta}}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta \theta$$

$$\Delta z = \frac{f(\tan \theta - d)}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta s + \frac{s(d + s)}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta f + \frac{f}{(s + f \tan \theta)} \Delta d - \frac{\frac{f^2(d + s)}{\cos^2 \theta}}{(s + f \tan \theta)^2} \Delta \theta$$

$$\Delta z = \frac{z^2(\tan \theta - d)}{(d + s)^2 f} \Delta s + \frac{sz^2}{(d + s)f^2} \Delta f + \frac{z}{(d + s)} \Delta d - \frac{z^2}{(d + s)\cos^2 \theta} \Delta \theta$$

ANNEXE 2

Calculs pour la triangulation 3D selon l'approche proposée

des X . Les hauteurs Z_h et Z_o sont connues et sont respectivement la hauteur maximale et la hauteur minimale.

L'équation de la droite du laser est donnée par :

$$Z = aX + b$$

où Z est la hauteur réelle et X est position réelle sur le convoyeur.

Etant données les associations (hauteur, position) suivantes :

$$(Z_h, X_h) \text{ et } (Z_o, X_o)$$

On déduit a et b :

$$Z_h = aX_h + b$$

$$Z_o = aX_o + b$$

On a alors :

$$a = \frac{Z_h - Z_o}{X_h - X_o}$$

Avec Z_o , on a :

$$b = -X_o \frac{Z_h - Z_o}{X_h - X_o} + Z_o$$

Avec Z_h , on a :

$$b = -X_h \frac{Z_h - Z_o}{X_h - X_o} + Z_h$$

On obtient alors :

$$Z = \frac{Z_h - Z_o}{X_h - X_o} (X - X_o) + Z_o \quad (1)$$

ou

$$Z = \frac{Z_h - Z_o}{X_h - X_o} (X - X_h) + Z_h \quad (2)$$

Relation entre la position réelle X et la valeur x projetée sur le CCD :

En utilisant la méthode des triangles équivalents, on obtient :

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{x - x_c}{Z_c} = \frac{x - X}{Z}$$

d'où

$$X = x - \frac{Z}{Z_c} (x - x_c) \quad (3)$$

Il est à noter que X et x sont dans le même référentiel F_w et ont donc par conséquent la même unité.

Relation entre la hauteur Z et la valeur x projetée sur le CCD :

En remplaçant l'équation (3) dans l'équation (1) :

$$Z - Z_o = \frac{(Z_h - Z_o) \left(x - \frac{Z}{Z_c} (x - x_c) - x_o - \frac{Z_o}{Z_c} (x_o - x_c) \right)}{x_h - \frac{Z_h}{Z_c} (x_h - x_c) - x_o - \frac{Z_o}{Z_c} (x_o - x_c)}$$

$$Z - Z_o = \frac{(Z_h - Z_o) (Z_c x - Zx + Zx_c - Z_c x_o + Z_o x_o - Z_o x_c)}{Z_c x_h - Z_h x_h + Z_h x_c - Z_c x_o + Z_o x_o - Z_o x_c}$$

Pour simplifier l'écriture, on pose D de la façon suivante:

$$D = Z_c x_h - Z_h x_h + Z_h x_c - Z_c x_o + Z_o x_o - Z_o x_c$$

En utilisant les deux dernières équations, on obtient :

$$\begin{aligned} D(Z - Z_o) &= (Z_h - Z_o)(Z(x_c - x) + Z_c(x - x_o) + Z_o(x_o - x_c)) \\ D(Z - Z_o) &= (Z_h - Z_o)Z(x_c - x) + (Z_h - Z_o)(Z_c(x - x_o) + Z_o(x_o - x_c)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DZ - Z(Z_h - Z_o)(x_c - x) &= DZ_o + (Z_h - Z_o)(Z_c(x - x_o) + Z_o(x_o - x_c)) \\ Z &= \frac{DZ_o + (Z_h - Z_o)(Z_c(x - x_o) + Z_o(x_o - x_c))}{D - (Z_h - Z_o)(x_c - x)} \end{aligned}$$

On pose :

$$A = DZ_o + (Z_h - Z_o)(Z_c(x - x_o) + Z_o(x_o - x_c))$$

et

$$B = D - (Z_h - Z_o)(x_c - x)$$

d'où

$$A = xZ_h Z_c + x_h(Z_o Z_c - Z_o Z_h) + x_o(Z_o Z_h - Z_h Z_c)$$

et

$$B = x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)$$

On obtient :

$$Z = \frac{A}{B} = \frac{xZ_h Z_c + x_h(Z_o Z_c - Z_o Z_h) + x_o(Z_o Z_h - Z_h Z_c)}{x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)} \quad (5)$$

L'équation est de la forme :

$$Z = \frac{\alpha x + \beta}{x + \lambda}$$

avec :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{Z_h Z_c}{Z_h - Z_o} \\ \beta &= \frac{x_h(Z_o Z_c - Z_o Z_h) + x_o(Z_o Z_h - Z_h Z_c)}{Z_h - Z_o} \\ \lambda &= \frac{x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)}{Z_h - Z_o} \end{aligned}$$

Si on pose $Z_o = 0$ alors on a :

$$Z = \frac{A}{B} = \frac{xZ_h Z_c - Z_h Z_c x_o}{xZ_h + x_h(Z_c - Z_h) - x_o Z_c}$$

L'équation est de la forme :

$$Z = \frac{\alpha x + \beta}{x + \lambda}$$

avec :

$$\begin{aligned} \alpha &= Z_c \\ \beta &= -x_o Z_c \\ \lambda &= \frac{x_h(Z_c - Z_h) - Z_c x_o}{Z_h} \end{aligned}$$

Calcul de l'erreur :

Par décomposition en série de Taylor, l'expression est de l'erreur absolue est donnée par :

$$z = g(x, x_o, x_h, Z_o, Z_h)$$

$$\Delta z = \frac{\partial g}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial x_o} \Delta x_o + \frac{\partial g}{\partial x_h} \Delta x_h + \frac{\partial g}{\partial Z_o} \Delta Z_o + \frac{\partial g}{\partial Z_h} \Delta Z_h$$

où Δx , Δx_o , Δx_h , ΔZ_o et ΔZ_h sont respectivement les erreurs de mesure des variables x , x_o , x_h , Z_o et Z_h . Les deux dernières erreurs sont négligeables face aux autres donc l'expression de l'erreur devient :

$$\Delta z = \frac{\partial g}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial x_o} \Delta x_o + \frac{\partial g}{\partial x_h} \Delta x_h$$

avec

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\alpha(x + \lambda) - (\alpha x + \beta)}{(x + \lambda)^2} = \frac{\alpha\lambda - \beta}{(x + \lambda)^2} = \frac{Z_h Z_c [x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_o} = \frac{Z_h (Z_o - Z_c) [x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)] - (Z_o - Z_c) [x Z_h Z_c + x_h Z_o (Z_c - Z_h) + x_o Z_h (Z_o - Z_c)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_o - Z_c) [x Z_h (Z_h - Z_o) + x_h Z_h (Z_c - Z_h) - x Z_h Z_c - x_h Z_o (Z_c - Z_h)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial Z_o} = \frac{(Z_o - Z_c) [x Z_h (Z_h - Z_o) + x_h (Z_h - Z_o) (Z_c - Z_h) - x Z_h Z_c]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h (Z_c - Z_h) + x_o (Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_o} = \frac{(Z_o - Z_c)[xZ_h(Z_h - Z_o - Z_c) + x_h(Z_h - Z_o)(Z_c - Z_h)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_o} = \frac{(Z_o - Z_c)[x(Z_h^2 - Z_hZ_o - Z_hZ_c) + x_h(Z_h - Z_o)(Z_c - Z_h)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_o} = \frac{(Z_o - Z_c)[x(Z_h - Z_o)(Z_h - Z_c) + x_h(Z_h - Z_o)(Z_c - Z_h) - xZ_oZ_c]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_o} = \frac{(Z_o - Z_c)(Z_h - Z_o)(Z_h - Z_c)(x - x_h) - xZ_oZ_c(Z_o - Z_c)}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{Z_o(Z_c - Z_h)[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)] - (Z_c - Z_h)[xZ_hZ_c + x_hZ_o(Z_c - Z_h) + x_oZ_h(Z_o - Z_c)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_c - Z_h)[xZ_o(Z_h - Z_o) + x_oZ_o(Z_o - Z_c) - xZ_hZ_c - x_oZ_h(Z_o - Z_c)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_c - Z_h)[xZ_o(Z_h - Z_o) + x_o(Z_o - Z_h)(Z_o - Z_c) - xZ_hZ_c]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_c - Z_h)[x(Z_oZ_h - Z_o^2 - Z_hZ_c) + x_o(Z_o - Z_h)(Z_o - Z_c)]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

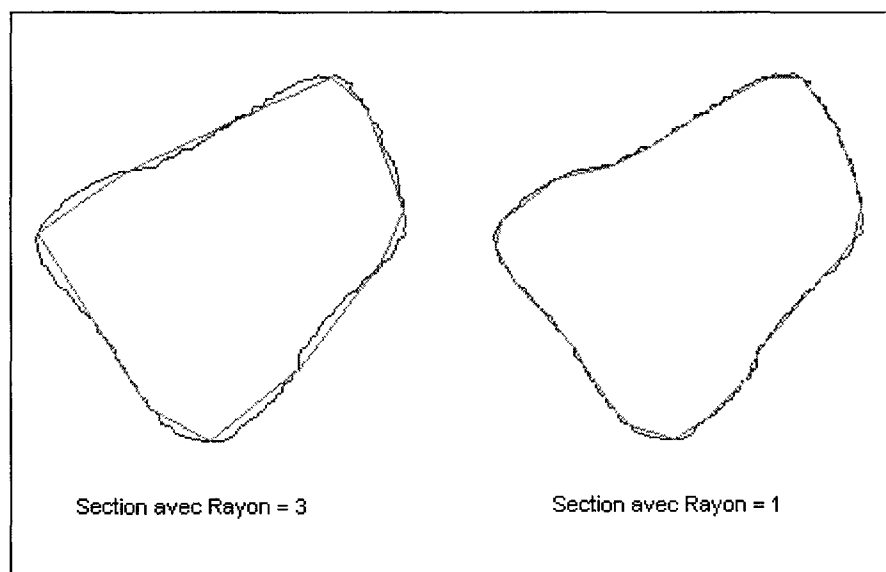
$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_c - Z_h)[x(Z_h - Z_o)(Z_o - Z_c) + x_o(Z_o - Z_h)(Z_o - Z_c) - xZ_oZ_c]}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_h} = \frac{(Z_c - Z_h)(Z_h - Z_o)(Z_o - Z_c)(x - x_o) - xZ_oZ_c(Z_c - Z_h)}{[x(Z_h - Z_o) + x_h(Z_c - Z_h) + x_o(Z_o - Z_c)]^2}$$

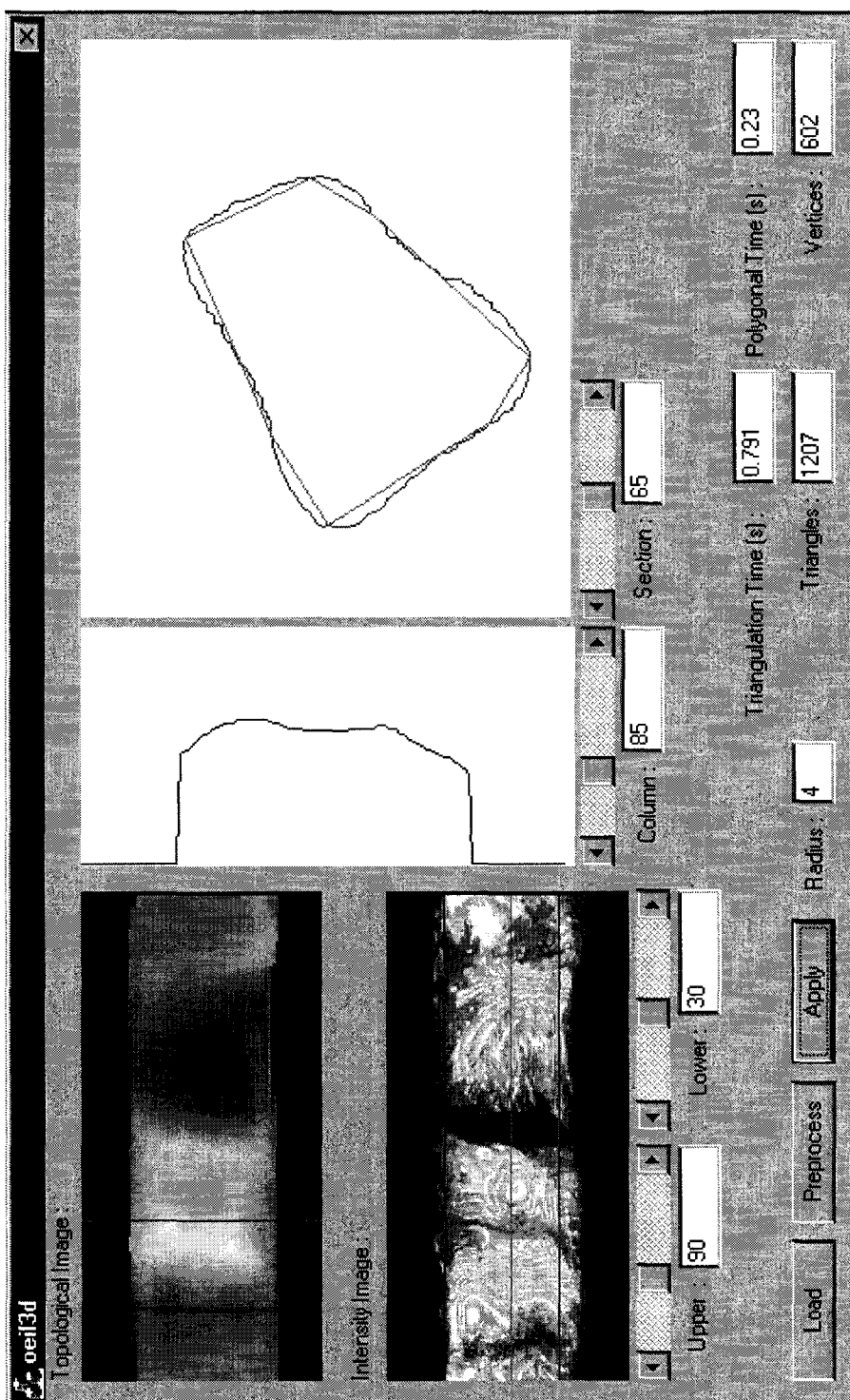
ANNEXE 3

Interface du logiciel de l'œil de ronde

Cette section présente les figures dans leur intégralité. La première consiste à deux exemples d'approximation polygonale pour la même section de viande.



La figure suivante montre l'interface usager développé pour l'application de l'œil de ronde. La partie de droite fournit les résultats de la reconstruction 3D tandis que la partie de gauche concerne principalement les paramètres d'entrée.



RÉFÉRENCES

- [ALE91] Alexander, B.F., Ng, K.C., (1991), Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation, Optical engineering, 30(9), pp. 1320-1331.
- [AYA87] Ayache, N., Faverjon, B., (1987), Efficient registration of stereo images by matching graph descriptions of edge segments, International. Journal of. Computer vision, 1(2), pp. 107-131.
- [BES88] Besl, P.J., (1988), Active Optical Range Imaging Sensors, dans Advances in Machine Vision, Ch.1, Springer Verlag.
- [BLA88] Blais, F., Rioux, M., Beraldin, J.-A., (1988), Practical Considerations for a Design of a High precision 3-D Laser Scanner System, SPIE Optomechanical and Electro-Design of Industrial Systems, 959, pp. 225-246.
- [BLA92] Blais, F., Lecavalier, M., Domey, J., Boulanger, P., Courteau, J., (1992), Application of the BIRIS Range Sensor for Wood Volume Measurement, NRC Report 35033.
- [CHE98] Cheriet, M., (1998), Cours SYS-821, Reconnaissance des Formes et Inspection, Notes de cours, Ecole de Technologie Supérieure.
- [COO83] Cook, L.T., Dwyer III, S.J., Batnitzky, S., Lee, K.R., (1983), A three dimensionnal display system for diagnostic imaging applications. IEEE Comput. Graphics Applications, 3(5), pp. 13-19.

- [DEB97] De Bakker, M., Verbeek, P.W., Steenvoorden, G.K., (1997), Design Consideration for a Range Image Sensor containing aPSD-array and an On-chip Multiplexer, Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, IEEE Computer Society Press, Ottawa, pp. 11-18.

- [FAU93] Faugeras, O., (1993), Three-dimensional Computer Vision : A Geometric Viewpoint, MIT press.

- [FOL93] Foley, J.D., Van Dam, A., Feiner, S.K., Hughes, J.H., (1993), Computer Graphics, Addison-Wesley Publishing Company.

- [FUC77] Fuchs, H., Kedem, Z.M., Uselton, S.P., (1977), Optimal surface reconstruction from planar contours, Communications of the ACM, 20(10) , pp. 693-702.

- [HOR96] Horn, B.K.P., (1996), Robot Vision, MIT press.

- [JAI95] Jain, R., Kasturi, R., Schunck, B., (1995). Machine Vision, McGraw-Hill.

- [JAR83] Jarvis, R.A., (1983), A perspective on range finding techniques for computer vision, IEEE Transact. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 5, pp. 122-139.

- [JOH92] Johnson, T., Livadas, P.E., (1992), Finding minimum cost acceptable paths in parallel, Technical Report, TR92-010.

- [KEP75] Keppel, E., (1975), Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines, IBM J. Res. Develop., 19, pp. 2-11.

- [KLE98] Klette, R., Schluns, K., Koschan, A., (1998), Computer Vision, Three-Dimensional Data from Images, Springer.

- [LEA92] Leavers, V.F., (1992), Shape Detection in Computer Vision Using the Hough Transform, Springer-Verlag.

- [LEH97] Lehman, K., (1997), Rejection of Data, Notes de cours, Departement of chemistry, Princeton university.

- [MAR76] Marr, D., Poggio, T., (1976), Cooperative computation of stereo disparity, Science, 194, pp. 283-287.

- [MEY92] Meyers, D, Skinner, S, Sloan, K, (1992), Surfaces from contours, ACM Transactions on Graphics, 11(3), pp. 228-258.

- [MUN87] Mundy, J.L., Porter, G.B, (1987), A Three-Dimensional Sensor based on Structured Light, dans « Three-Dimensional Machine Vision » pat Kanade T., Kluwer Academic Publishers.

- [OTS79] Otsu, N., (1979), A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), pp. 62-66.

- [PAV74] Pavlidis, T., Horowitz, S.L., (1974), Segmentation of Plane Curves, IEEE Transactions on Computers, C-23(8), pp. 859-870.

- [POS87] Postaire, (1987), De la Théorie à la Décision, Paris: Bordas.

- [POU89] Poussart, D., Laurendeau, D., (1989) 3-D Sensing for Industrial Computer Vision, dans Advances in Machine Vision, Ch.3, édité par Sanz J.L.C., Springer Verlag, pp. 122-159.

- [RIO86] Rioux, M., (1986), Laser Range finder based on synchronized scanners, dans « Robot Sensors : Vision », 1, édité par Pugh A., IFS Publications Ltd, Uk, pp. 175-190.

- [SER83] Serra, J., (1983), Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press.

- [SHI87] Shirai, Y., (1987), Three-dimensional Computer Vision, Berlin : Springer.

- [SLA80] Slansky, J., Gonzalez, V., (1980), Fast Polygonal Approximation of Digitized Curves, Pattern Recognition, 12, pp. 327-331.

- [TEE98] Teerd Enzing, J.F., (1998), Threats and Opportunities in Meat Processing, Proceedings of First International Workshop on Future Automation for Meat Processing, pp. 1-4.

- [THE93] Théodoracatos, V., Calkins, D., (1993), A 3D Vision System Model for Automatic Object Surface Sensing, International Journal of Computer Vision, 11(1), pp. 75-99.

- [TRU98] Trucco, E., Verri, A., (1998), Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall.

- [VIN91] Vincent, L., (1991), Cours de Morphologie, Noesis Vision Inc.
- [VIS98] Visual Information Technology, (1998), Synchronized Laser Scanner Principle, <http://www.vit.iit.nrc.ca>.
- [WAN85] Wang, Y.F., Aggarwal, J.K., (1985), Construction of surface representation from 3-D volumetric scene description, Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco, CA, pp. 130-135.
- [YE96] Ye, Q., (1996), A structured light based range camera, Proceedings of the 7th Scandinavian Conference on Image Analysis, 2, pp. 815-822.